

UNTERSUCHUNGEN AN SOLIFLUKTIONSFORMEN

MIT HILFE DER NAHBEREICHSPHOTOGRAMMETRIE

Vergleich von Oberflächenformen
in Westspitzbergen, den Schweizer Alpen und am Kilimanjaro

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung
der philosophischen Doktorwürde

vorgelegt der
PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT II
DER UNIVERSITÄT ZÜRICH

von

GERHARD KASPER
von Au (SG)

Begutachtet von Herrn Prof. Dr. G. Furrer

ZÜRICH 1975

UNTERSUCHUNGEN AN SOLIFLUKTIONSFORMEN

MIT HILFE DER NAHBEREICHSPHOTOGRAMMETRIE

Vergleich von Oberflächenformen
in Westspitzbergen, den Schweizer Alpen und am Kilimanjaro

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung
der philosophischen Doktorwürde

vorgelegt der
PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT II
DER UNIVERSITÄT ZÜRICH

von

GERHARD KASPER
von Au (SG)

Begutachtet von Herrn Prof. Dr. G. Furrer

Zürich 1975



VORWORT

Diese Dissertation entstand unter der Leitung von Prof. G. Furrer in den Jahren 1969 - 73. Seine wertvollen Anregungen haben zum Gelingen der Arbeit wesentlich beigetragen. Für seine wohlwollende Hilfe danke ich ihm herzlichst.

Besonderen Dank schulde ich meinem Lehrer Prof. H. Boesch, der mein Interesse für die Geographie geweckt hat.

Mein Dank richtet sich auch an Prof. K. Kaiser, der mich in manchen Diskussionen mit aufbauender Kritik zu neuen Ueberlegungen anregte.

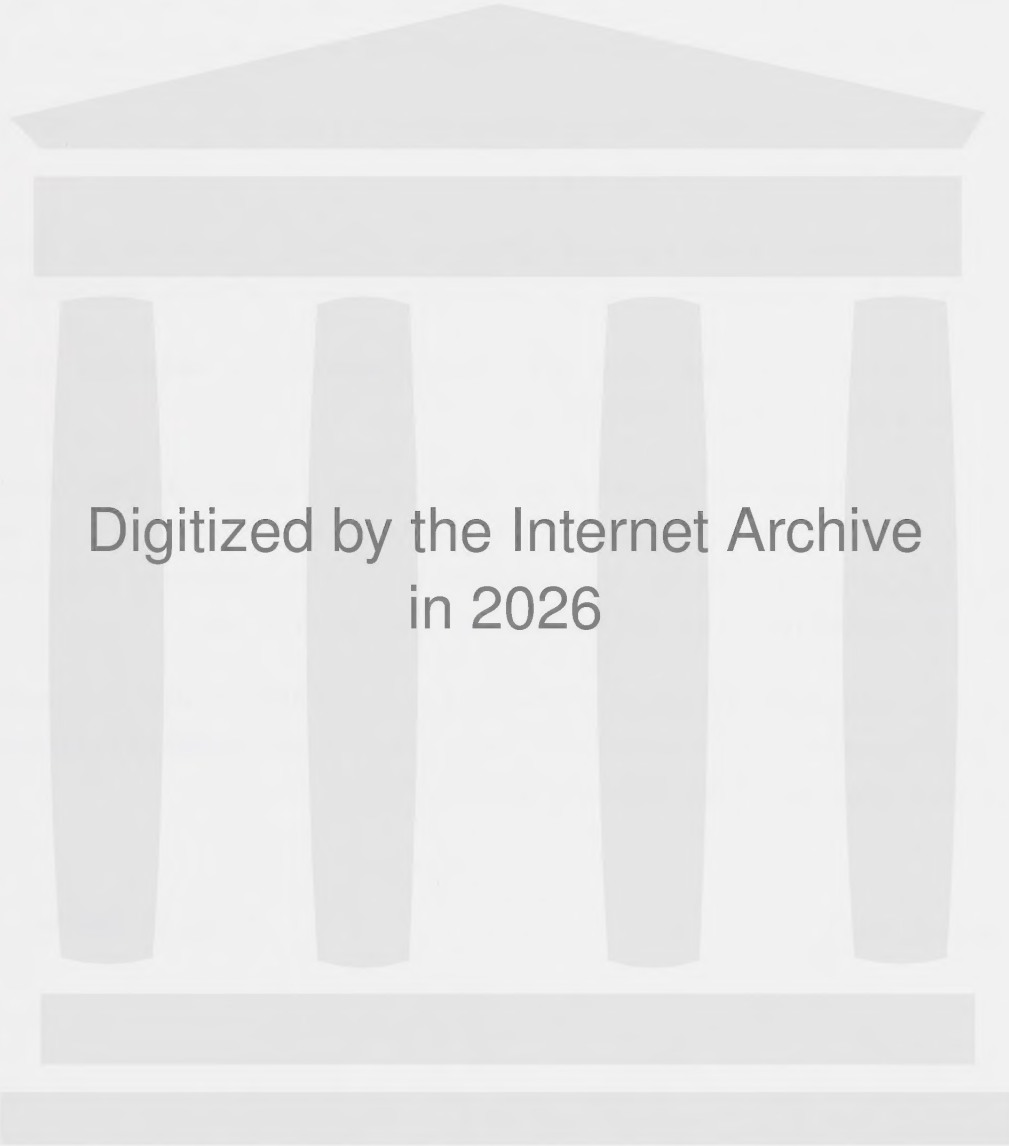
Prof. E. Batschelet sei hier für die mathematische Beratung und das rege Interesse an dieser Arbeit gedankt.

Für die zur Verfügung gestellten Instrumente danke ich dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich, ferner Herrn Dir. R. Gees und seinen Mitarbeitern der Firma Wild Heerbrugg AG für spezielle Geräteergänzungen, welche die Aufnahmearbeiten überhaupt erst ermöglichten.

Allen Freunden und Studienkollegen, die mir während den Feldaufnahmen und den Laborexperimenten mit manchen Anregungen und kameradschaftlicher Hilfe zur Seite standen, bin ich dankbar verpflichtet.

Wil, Dezember 1973

Gerhard Kasper



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41507208_0080

Zusammenfassung

Es wird gezeigt, wie sich mit Hilfe der Stereophotogrammetrie des Nahbereichs Frostbodenmuster und -formen bis zu einigen Quadratmetern Fläche erfassen und exakt ausmessen lassen. Diese Methode gestattet objektive quantitative Vergleiche entsprechender Formen. Sie kann sowohl bei metergrossen Steinringen als auch bei zentimetergrossen Erdknospen angewendet werden.

Die Oberflächen der Frostmusterformen werden nach Raumkoordinaten entlang von Profillinien ausgemessen und diese mit quadratischen Parabeln bestmöglich angenähert. Eine oder zwei "normierte Parabeln" drücken den jeder Form eigenen Oberflächenverlauf aus und liefern die Zahlenwerte für Längen- und Höhenvergleiche. Wie aus den Figuren 6 und 7 hervorgeht, ist der Oberflächenverlauf bei gleichen Formen verschiedener Gebiete so auffallend ähnlich, dass man diese als morphologische Typen ansprechen darf. Ausserdem zeigen die erwähnten Figuren deutlich den Unterschied zwischen den Oberflächen von Steinringen - als Vertreter von Grossformen - und jenen der Erdknospen (Miniaturformen).

An einem Kammeisfeld auf dem Sattelplateau des Kilimanjaro konnten photogrammetrisch das Wachsen der Eisnadeln sowie die Verlagerung der nachts angehobenen Erdkrümel nach dem Abschmelzen festgestellt werden. Die Messwerte zeigen, dass Kammeisbildung und Temperaturverlauf an der Bodenoberfläche zusammenhängen. Im Tieftemperaturlabor wurde die Kammeisbildung im Modellversuch unter kontrollierten Bedingungen untersucht; die Ergebnisse decken sich gut mit den Messresultaten aus der Natur.

Feldbeobachtungen am Kilimanjaro brachten einen neuen Aspekt zu den von TROLL (1944) postulierten "windgestreiften Auffrierböden". Massgebend für die Streifung eines Kammeisfeldes ist eher das Wechselspiel zwischen Schlagschatten - beispielsweise von Grasbüscheln herrührend - und den ersten, das Feld treffenden Sonnenstrahlen.

Summary

It is shown how patterns and forms of soil caused by frost up to an area of a few square meters can be captured and measured precisely with the help of close-range stereophotogrammetry. This method permits an objective quantitative comparison of corresponding forms. It can be applied for stone circles of a few meters or so in diameter as well as for "soil buds" of a few centimeters in size.

The surface of "frost-borne structures" is measured in terms of x-, y-, z-coordinates along profiles and approximated as close as possible by parabolas of quadratic type. One or two "standardized parabolas" describe the tendency of the surface which is typical for each form; they also furnish the values for comparison of lengths and heights. As shown in figures 6 and 7 the surface characteristics of the same forms occurring in different areas are so strikingly similar that they might be regarded as morphological types. Moreover, these figures clearly show the difference between the surface of stone circles - representing large forms - and those of "soil buds" (miniature forms).

On a needle ice field on Kilimanjaro Saddle the growth of ice needles as well as the displacement of "soil crumbs" - following the melting - that were lifted during the night could be photogrammetrically determined. Measurements indicate that there is a correspondence between the growth of ice needles and the temperature at the soil surface. In a low-temperature-laboratory the development of ice needles was investigated under controlled conditions; these results correspond well with the measurements in the field.

Field observations on Kilimanjaro revealed a new aspect of Troll's (1944) theory on "windgestreifter Auffrierboden". For the formation of stripes in a needle ice field an alternation of cast shadow - e.g. caused by tufts of grass - and the first sunrays hitting the ground is decisive.

Résumé

Il est démontré comment, à l'aide de la stéréophotogrammétrie rapprochée, on peut saisir et mesurer exactement à quelques mètres carrés de près des sols à figures géométriques et structuraux. Cette méthode permet une comparaison quantitative objective de sols correspondants. Elle peut être appliquée aussi bien pour des cercles de pierre mesurant plusieurs mètres que pour des cercles de pierre centimétriques.

Les surfaces des sols structuraux sont mesurées selon les coordonnées le long de lignes profilées qui sont rapprochées le mieux possible à l'aide de paraboles carrées. Une ou deux paraboles standardisées expriment le caractère de la surface propre à chaque sol structural et fournissent les valeurs pour les comparaisons des hauteurs et longueurs. Il ressort des tableaux 6 et 7 que les caractères de la surface de sols égaux de régions différentes se ressemblent de façon si frappante que l'on peut les appeler des types morphologiques. En outre, ces sols montrent clairement la différence entre les surfaces de cercles de pierre - représentant les macroformes - et celles de cercles centimétriques (microformes).

Sur un champ de pipkrake de Kilimanjaro, on a pu constater, à l'aide de la photogrammétrie, la croissance des aiguilles de glace ainsi que le déplacement des miettes de sol, soulevées pendant la nuit, après la fonte. Les valeurs obtenues montrent qu'il existe un rapport étroit entre la formation de pipkrake et la situation thermique près de la surface des sols. Au laboratoire à basses températures, au cours d'un essai-modèle, on a étudié la formation de pipkrake sous des conditions contrôlées. Les résultats correspondent très bien aux valeurs obtenues dans la nature.

Des observations faites sur les champs du Kilimanjaro ont apporté un nouvel aspect aux "windgestreifte Auffrierböden" postulées en 1944 par M. Troll. Ce qui importe pour les stries d'un champ de pipkrake est avant tout l'alternance entre les ombres portées - provenant p.ex. de touffes d'herbes - et les premiers rayons solaires qui atteignent le champs.

INHALTSVERZEICHNIS

A.	Einführung	5
1.	Problemstellung und Zielsetzung	5
2.	Wahl der Untersuchungsmethode	6
B.	Die Untersuchungsmethode	7
1.	Die Nahbereichsphotogrammetrie	7
1.1.	Die Vorteile der Nahbereichsphotogrammetrie	8
1.2.	Instrumentarium für die Nahbereichsphotogrammetrie	9
1.2.1.	Die Stereokammer WILD C-40	10
1.2.2.	Das Spezialstativ	11
1.2.3.	Das photographische Material	12
1.2.4.	Innere und äussere Orientierung der Messbilder	12
1.2.5.	Räumliche Betrachtung der Aufnahmen	13
1.2.6.	Die Auswertegeräte	13
1.2.7.	Genauigkeiten	14
1.2.8.	Verarbeiten der Messdaten	15
2.	Das Erfassen der formtypischen Merkmale von Solifluktförmungen	15
3.	Beispiel einer Auswertung und Verarbeitung der Daten	18
C.	Die Oberflächenformen von frostgemusterten Böden in der Natur	22
1.	Grossformen	22
1.1.	Steinringe	22
1.2.	Die photogrammetrischen Aufnahmen	23
1.3.	Das Registrieren der Profile	24
1.3.1.	Senkrechtaufnahmen	24
1.3.2.	Geneigte Aufnahmen	24
1.4.	Glättungsabschnitte	25
1.5.	Regressionsparabeln an die Teilkurven	25
1.6.	Ergebnisse	26
1.6.1.	Die Oberflächendimensionen der ausgemessenen Steinringe (Vergleich mit den Werten aus der Literatur)	26
1.6.2.	Die Oberflächenkrümmungen der ausgemessenen Steinringe	31
1.6.3.	Die relativen Höhenverhältnisse an den untersuchten Steinringen	33
1.7.	Zusammenfassung der in den Abschnitten 1.6.1. bis 1.6.3. erzielten Ergebnisse	34

2.	Kleinformen	35
2.1.	Erdknospen	35
2.1.1.	Ergebnisse	37
2.1.1.1.	Die Dimensionen der ausgemessenen Erdknospen	37
2.1.1.2.	Das Verhältnis Feinerderadius zur Breite des Feinkieswalles	38
2.1.1.3.	Die relativen Höhenverhältnisse an Erdknospen mit abgrenzbaren Schuttrahmen	40
2.1.1.4.	Die Feinerderadien und die Aufwölbung der Feinerdefläche	40
2.2.	Erdstreifen	41
2.2.1.	Ergebnisse	45
2.2.1.1.	Die Verhältnisse Erdstreifen- zu Schuttstreifenbreite	45
2.2.1.2.	Vergleich zwischen Querprofilen durch Erdstreifen und zwischengelagerte Steinstreifen	47
2.2.1.3.	Bemerkungen zum Verlauf der Erdstreifen	48
3.	Kammeisbeobachtungen am Kilimanjaro	49
3.1.	Versuchsfeld und Durchführung der Aufnahmen	49
3.2.	Die Ausmessung	50
3.3.	Ergebnisse	51
3.4.	Das Problem der gestreiften Auffrierböden	53
D.	Kammeisversuche im Labor	56
1.	Einleitung	56
1.1.	Die Versuchsanordnung	58
1.2.	Temperaturmessungen	59
1.3.	Die photogrammetrischen Aufnahmen	59
1.4.	Die photogrammetrische Ausmessung	60
1.5.	Verarbeitung der Registrierwerte	61
1.6.	Ergebnisse	61
1.6.1.	Kammeis auf horizontaler Bodenfläche	61
1.6.2.	Kammeis auf geneigter Bodenfläche	62
1.7.	Zusammenfassung der Ergebnisse	64
E.	Ergebnisse und Ausblick	65
	Literaturverzeichnis	68

A. EINFUEHRUNG

1. Problemstellung und Zielsetzung

Die Erforschung von gemusterten Böden begann bereits im letzten Jahrhundert vor allem in Polargebieten. Massgeblicher Einfluss zur Entstehung solcher Bodenformen wurde schon sehr früh dem Frost und den ihn begleitenden Wirkungen zuerkannt. Aber erst nach und nach, dem allgemeinen Fortschritt der Wissenschaften folgend, wurde die rein formale Beschreibung der oberflächlich sichtbaren Phänomene abgelöst durch eine mehr oder minder gesamthafte Zusammenschau verschiedener, die Entstehung solcher Formen bewirkender Vorgänge. Im Jahr 1906 berichtet ANDERSSON von 18 verschiedenen Hypothesen aus dem 19. Jahrhundert zur Bildung solcher Strukturformen. In der Folge gesellten sich weitere, aus detaillierteren Untersuchungen hervorgegangene hinzu. Allerdings konnten viele in der Hauptsache auf theoretischen Ueberlegungen fussende Hypothesen durch direkte Beobachtungen in der Natur oder im Laborversuch widerlegt werden. Es waren dies im wesentlichen solche, denen eine nur wenige Faktoren berücksichtigende Modellvorstellung zugrunde lag; wie z.B. die Konvektionsströmungstheorie für die Entstehung von Steinringen (GRIPP, 1927).

In neuerer Zeit muss das Zusammenspiel vieler für die Entstehung gemusterter Böden bestimmender Vorgänge als erwiesen gelten. BUEDEL (1960) berichtet von 18 Einflussgrössen, die er für die Ausbildung von Strukturböden unter Berücksichtigung der Dynamik unterschieden haben möchte.

Bei der Formungserforschung gemusterter Böden leitet die interpretierende Betrachtung von der Basis statisch erfassbarer Daten (wie Korngrössenverteilung, Wassergehalt, Gesteinsbeschaffenheit, Mächtigkeit und Tiefe der Form) zur Dynamik über (Frosteindringung, Wasserzirkulation, Bewegung der Bodenteilchen, u.a.) und führt letztlich zu einer integralen, möglichst alle Einflüsse berücksichtigenden Bildungshypothese.

In der Erforschung einzelner isolierbarer Faktoren nach physikalischen und chemischen Gesichtspunkten ist es trotz bemerkenswerter Fortschritte in jüngerer Zeit durch naturgetreue oder zumindest naturähnliche Laboruntersuchungen noch nicht gelungen, ein allgemeines und nachweislich richtiges Gesetz für die Ausbildung von Struktur- und Texturböden aufzustellen.

Wenn, wie oben erwähnt, statisch erfassbare Werte als beste Grundlage für Betrachtungen der Dynamik dienen, so ist erwähnenswert, dass ein Aspekt meines Wissens bislang mangels geeigneter Verfahren noch nicht messend behandelt worden ist : die Form der Oberfläche.

Es schien mir deshalb aufschlussreich zu sein, diese - für das Erarbeiten von Bildungsvorstellungen - wichtigen Obeflächenformen näher zu betrachten. Besonders seit TROLLs umfassendem Werk über Solifluktion und Frostklimate der Erde spricht man im allgemeinen von der "arktischen Grossform", die mit dem jahreszeitlichen Frost zusammenhängt und den "Miniaturformen der tropischen Hochgebirge", für deren Ausbildung die tageszeitlichen Fröste genügen. Im Rahmen von Forschungs Expeditionen des Geographischen Institutes der Universität Zürich unter der Leitung von Prof. G. Furrer bot sich mir Gelegenheit, auf Westspitzbergen (78° N) und am Kilimanjaro (3° S) gemusterte Böden zu untersuchen. Die Formen extremer Breitenlagen konnten mit jenen mittlerer Breite (Schweizer Alpen) verglichen werden.

Soweit aus der mir zugänglichen Literatur hervorgeht, bediente sich die Forschung bis heute zwar der Photographie und Zeichnung, vervollständigt durch erläuternde Beschreibung und Erklärung, um spezifische gestaltliche Eigenarten der Formen zu zeigen. Notwendigerweise haftet diesen Darstellungsarten eine mehr oder weniger ausgeprägte Subjektivität an - Genauigkeit und Aussagekraft sind begrenzt.

Wegen dieser bisher stiefmütterlichen und ungenauen Behandlung der Morphographie drängte es sich auf, einen Weg zur objektiven, genauen und damit vergleichbaren Erfassung solcher Formen zu finden, das heisst, sie mit ausreichender Genauigkeit und Dichte auszumessen und zu versuchen, sie als digitale Geländemodelle durch Koordinaten und Ausgleichsfunktionen zu typisieren.

Um dieses Ziel zu erlangen, waren 1) ein zur Ausmessung von Oberflächenformen geeignetes Verfahren zu finden und 2) einfache und doch möglichst genaue Darstellungsarten für die mannigfachen Ausbildungsformen der gemusterten Böden zu entwickeln.

2. Die Wahl der Untersuchungsmethode

Aus der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ergaben sich für die Wahl der Untersuchungsmethoden folgende Forderungen:

1. Quantitative Erfassbarkeit der durch solifluidale Einflüsse entstandenen "Grossformen" (nicht grösser als wenige Meter) der Erdoberfläche ohne deren Zerstörung oder Veränderung durch den Messvorgang.

2. Die Methode muss sich für Detailmessungen an Kleinformen (Ausdehnung wenige cm) ebenso eignen wie für Messungen an dezimeter- bis meter-grossen Formen. Die relative Genauigkeit soll also wenn möglich innerhalb 1 - 2 % der Grösse der untersuchten Einzelform liegen.
3. Die zur Aufnahme verwendeten Messgeräte sollen auch bei extremen Witterungsverhältnissen feldtauglich, einfach und rasch zu handhaben sein.
4. Die Auswertung der Messdaten muss analog und digital erfolgen können, damit die Verarbeitung sowohl graphisch als auch rechnerisch möglich ist.
5. Die Verarbeitung der digitalen Messdaten zur Erzielung typisierender Geländemodelle soll mit Hilfe von Rechenautomaten erfolgen; deshalb ist es wünschenswert, die Einzeldaten bereits bei der Auswertung der Aufnahmen auf Datenträgern (Lochkarten oder Lochstreifen) zu registrieren.

Als günstigste und allen Forderungen gerecht werdende Methode bietet sich die Nahbereichs-Stereophotogrammetrie an. So naheliegend die Verwendung der Photogrammetrie ist, scheint sie meines Wissens für derartige Untersuchungen noch nicht angewendet worden zu sein. Der Grund liegt wohl darin, dass die recht kostspieligen Apparate relativ selten und deshalb nicht ohne weiteres verfügbar sind. Wohl wären auch stereophotographische Kleinbildaufnahmen ein mögliches Hilfsmittel. Im Vergleich zu photogrammetrischen Präzisionsgeräten weisen diese jedoch zu viele technische Unzulänglichkeiten auf, namentlich was die Stabilität und die Abbildungsgeometrie der Objektive anlangt.

B. DIE UNTERSUCHUNGSMETHODE

1. Die Nahbereichsphotogrammetrie

Die Photogrammetrie oder Bildmessung ist ein Verfahren, bei dem man aus photographischen Aufnahmen Form, Grösse und Lage der Aufnahmegegenstände ermittelt.

Jede photographische Aufnahme bestimmt ein Aufnahmestrahlenbündel. Wenn es gelingt, dieses aus den Bildpunkten und dem Projektionszentrum zu rekonstruieren, ferner zwei oder mehrere Strahlenbündel von verschiedenen bekannten Stand-

punkten zueinander so zu orientieren, wie sie bei der Aufnahme lagen, schneiden sich homologe Strahlen in Objektpunkten. Bei verzeichnungsfreien Objektiven ermöglichen sie eine genaue Rekonstruktion des Aufnahmegegenstandes.

Der einfachste Aufnahmefall, der sich sowohl für die stereoskopische Betrachtung der Bilder als auch zur Ausmessung des Aufnahmegegenstandes eignet, ist die Doppelbildmessung mit parallelen Aufnahmeachsen senkrecht zur Aufnahmebasis. Die Basis ist der Abstand der Projektionszentren der beiden Aufnahmen. In der Nahbereichsphotogrammetrie ist es üblich, bereits in diesem Sinn orientierte Doppelkamern zu verwenden (Photo 1).

Zur Betrachtung der Aufnahmen wird jedem Auge das entsprechende Teilbild der Parallelaufnahmen zugeführt. Analog dem Vorgang des natürlichen stereoskopischen Sehens verschmelzen beide Bilder zu einem Raummodell des Aufnahmegegenstandes, das in geeigneten Geräten ausgemessen werden kann (siehe Absatz 1.2.6.).

1.1. Die Vorteile der Nahbereichsphotogrammetrie

Das Gebiet der Nahbereichsphotogrammetrie umfasst entsprechend der üblichen Bezeichnung Aufnahmedistanzen von etwa 1 Meter bis zu mehreren Zehnermetern. Die Vorteile der photogrammetrischen Methode - hier insbesondere der Nahbereichsphotogrammetrie - sind:

- die Messaufnahme nimmt einschliesslich der Vorbereitung wenig Zeit in Anspruch - und zwar unabhängig davon, wie kompliziert die Struktur des Objektes auch sein mag.
- Die abzubildenden Objekte müssen weder betreten noch berührt, noch sonstwie verändert werden. Daraus ergibt sich eine ausgezeichnete Anwendbarkeit für die Aufnahme von langsamen Zustandsänderungen.
- Die Stereoskopie der Messbilder vergrössert den Informationsgehalt gegenüber Einzelbildern beträchtlich; der im Aufnahmezeitpunkt herrschende Zustand wird in allen Einzelheiten objektiv festgehalten. Die Stereoskopie ermöglicht eine einfache und sichere Erfassung der Form.

- Aufnahme und Auswertung sind zwei zeitlich völlig getrennte Arbeitsgänge. Die Auswertung erfolgt unabhängig von Feldeinflüssen (z.B. Witterung) zu einem beliebigen Zeitpunkt in aller Ruhe und kann jederzeit wiederholt und ergänzt werden. Sogar nach Jahren lassen sich die Bilder unter Berücksichtigung vielleicht neuer Kriterien analysieren.
- Wenn man die Aufnahmebasis nicht kleiner als etwa $1/6$ der Aufnahmedistanz wählt, sind die eingangs geforderten Genauigkeiten der ausgemessenen Bild-details eingehalten.

1.2. Das Instrumentarium für die Nahbereichsphotogrammetrie

Gesicherte Ergebnisse im angeführten Sinn erhält man auf wirtschaftliche Art nur, wenn man sich von vornherein für die Verwendung eines optimalen Instrumentariums entscheidet.

Seit nahezu 50 Jahren baut die schweizerische Instrumentenindustrie photogrammetrische Aufnahme- und Auswertegeräte für den Nahbereich *), die sich mit kleinen Anpassungen auch für die Ausmessung geomorphologischer Kleinformen eignen.

Die bewährteste von mir verwendete Ausrüstung besteht aus folgenden Teilen:

- 1) Stereometerkammer WILD C-40 mit Spezialstativ für Senkrecht- und Schrägaufnahmen (Photo 2)
- 2) Spiegelstereoskop (Photo 3)
- 3) Stereokartiergerät WILD A-9 und WILD A-40 mit Profiloskop, elektrischem Koordinatenregistriergerät WILD EK-5, elektrischer Schreibmaschine IBM, Streifenlocher WILD SL-15 oder IBM-Kartenlocher (Photo 4)
- 4) Für Schrägaufnahmen Anschluss eines Transformationsgetriebes an den Autographen A-40.

*) bisher in erster Linie für Unfall- und Tatbestandesaufnahmen der Polizei wie auch in der Architekturphotogrammetrie verwendet.

1.2.1. Die Stereometerkammer WILD C-40

Diese Kamera entsprach sämtlichen an sie gestellten Forderungen sowohl bei den Aufnahmen im Feld als auch bei den Laboruntersuchungen. Sie vereinigt hervorragende optische und mechanische Qualität, ist einfach zu handhaben und selbst unter extremen klimatischen Verhältnissen robust und störungsfrei. Nicht einmal die rauhe Behandlung durch die Träger am Kilimanjaro vermochte die Funktionsfähigkeit und Genauigkeit zu beeinträchtigen; das zeigten alle nachträglich angestellten Kontrollen und Genauigkeitstests im Herstellerwerk.

Aufbau und technische Daten *)

An den Enden eines biegesteifen und verwindungsfreien Basisrohres sind die beiden Aufnahmekammern symmetrisch zur Basismitte angebracht. Sie sind derart befestigt, dass ihre Aufnahmeachsen zueinander parallel und rechtwinklig zur Basis stehen. Ihr Abstand voneinander beträgt 40 cm. Eine stabile Halterung an der Mitte des Rohres nimmt den anklemmbaren Teil des Neigekopfes auf, an dem die Kammer am Stativ aufgehängt oder aufgesetzt wird. Dieser Neigekopf ermöglicht es, die Aufnahmeachse in verschiedenen Winkeln gegen die Vertikale zu fixieren (0, 15, 30, 45, 60, 75 und 90°) und erlaubt damit eine dem Aufnahmeobjekt und der Hangneigung angepasste Ausnützung des Bildformates.

Die beiden Objektive haben eine nominelle Brennweite von 64 mm, die Blenden lassen sich stufenweise von f/8 bis f/32 einstellen. Die Verschlüsse sind für Belichtungszeiten von 1 sec bis 1/500 sec, sowie für längere Expositionen in Stellung "B" eingerichtet. Die Verzeichnung der Objektive ist auch in den Randzonen kleiner als 4 Mikrometer, d.h. die radialen Verschiebungen der exakten geometrischen Zentralprojektion sind vernachlässigbar klein.

Die Aufnahme erfolgt auf Platten von 6,5 x 9 cm. Für das nutzbare Bildformat von 60 x 80 mm ergibt sich ein seitlicher Bildwinkel von 64°. Die Bildhaupthorizontale ist gegenüber dem Bildhauptpunkt um 10 mm versetzt, was bei den üblichen terrestrischen Aufnahmen mit horizontaler Aufnahmeachse,

*) zur Erklärung der verwendeten Fachausdrücke sei auf die photogrammetrische Fachliteratur verwiesen, besonders auf LEHMANN (1966).

für die die Kamera in erster Linie konzipiert ist, die günstigste Anpassung an die Höhenausdehnung des Objektes ermöglicht. Der obere Bildwinkel beträgt 32° , der untere $17^{\circ}20'$ (Fig. 1). Auf die Auswirkungen bei Senkrechtaufnahmen mit exzentrisch hängender Kamera wird weiter unten eingegangen.

Die Bildausschnitte lassen sich auf Mattscheiben kontrollieren. Bei jeder Belichtung bilden sich bei der Aufnahme Rahmenmarken mit ab, die der Einpassung der Bilder im Stereoautographen dienen.

Das Spannen der Verschlüsse, das Einstellen der Blendenöffnung und der Belichtungszeit erfolgen für beide Kammern gemeinsam mit zentralen Knöpfen am Schaltkasten in der Mitte des Basisrohres. Aus Gründen der Gewichtseinsparung wurde bei Feldaufnahmen auf die elektromagnetische Verschlussauslösung verzichtet und statt dessen die pneumatisch-mechanische verwendet.

Mit den zwei senkrecht zueinander liegenden Röhrenlibellen lässt sich die Aufnahmeachse in die gewünschte Richtung (Neigung zur Vertikalen) bringen und die Basis horizontieren.

1.2.2. Das Spezialstativ

Zu Beginn der Untersuchungen kam das serienmässig Holzstativ zum Einsatz, das sich aber bei Feldaufnahmen als unzulänglich erwies. Auf diesem besonders für Horizontalaufnahmen geeigneten Stativ kann die Stereokammer, mit Neigekopf auf einem Standrohr sitzend, in die Höhe ausgefahren werden. Vertikalaufnahmen sind zwar auch möglich, aber die mitabgebildeten Stativbeine verdecken jeweils einen Teil des Objektes. Durch Neigen der Aufnahmeachse liess sich diese Störung ausschalten, doch ergab sich eine beträchtliche Arbeiterschwernis am Auswertegerät und bei der Datenverarbeitung (vgl. Absatz 1.3.6.). Die Herstellerfirma erklärte sich gerne bereit, deshalb ein Spezialstativ anzufertigen, das diese Schwierigkeiten und Unzulänglichkeiten aus dem Weg räumte. Der wesentliche Unterschied zum Serienstativ der C-40 liegt darin, dass beim neuen Aluminiumstativ Neigekopf und Kamera nicht auf dem Stativteller sitzen, sondern an diesem unten befestigt sind und zwischen den drei Beinen hängen (Photo 2). Die etwas umständlichere Höhenverstellung und das Ausrichten der Kamera wurden durch zwei gewichtige Vorteile wettgemacht. Bei hängender

Stereokamera genügt in den meisten Fällen der Höhenverstellbereich des Statives, um auch grössere Bodenflächen ohne störende Stativbeine in den angestrebten Senkrechtaufnahmen abzubilden (Fig. 2). Nur in seltenen Fällen, z.B. bei gewissen Hangneigungen, ist bei dem Spezialstativ eine Neigung der Aufnahmeachsen nötig. Die zweite Annehmlichkeit lernten wir auf den oft langen Anmarschwegen auf Spitzbergen und in der dünnen Luft des Sattelplateaus am Kilimanjaro schätzen. Zerlegt und aufgeteilt auf zwei oder drei hilfreiche "Träger" liess sich das Stativ bequem transportieren.

Aus der Forderung, die Aufnahmeobjekte nicht durch Tritts Spuren zu verändern, erwuchsen bei Senkrechtaufnahmen anfänglich Schwierigkeiten; eine Ueberprüfung des Bildausschnittes durch die Mattscheibe vor der Belichtung war nicht möglich. Mit einiger Erfahrung konnten die Grenzen des abgebildeten Gemeinsamkeitsbereiches allerdings befriedigend genau abgeschätzt werden.

1.2.3. Das photographische Material

Die Stereokamera ist ausschliesslich für Photoplatten des Formates 6,5 x 9 cm eingerichtet. Glasplatten werden der hohen Qualität des Objectives bei Präzisionsaufnahmen am besten gerecht. Keine Verbiegung oder Verzug der photographischen Schicht mindern die Auswertegenauigkeit. Unter feldmässigen Bedingungen jedoch war das Hantieren mit Kassetten und Glasplatten im Dunkelsack und das lichtdichte Verpacken des belichteten Materials sehr zeitraubend. Rollfilme, wie sie alternativ zu Platten bei manchen Phototheodoliten verwendet werden, könnten hier vieles vereinfachen. Es wären jedoch für die Filmebnung Anpressplatten aus optischem Glas in der Rahmenebene anzubringen und in die Aufnahmeoptik einzurechnen.

1.2.4. Innere und äussere Orientierung der Messbilder

Die photogrammetrischen Aufnahmekammern zeichnen sich im Vergleich zu den üblichen Photoapparaten dadurch aus, dass sie stets eine eindeutige geometrische Abbildung gewährleisten. Ihre sogenannte "innere Orientierung" ist definiert durch die auf Hundertstel Millimeter bekannte Bildweite (auch Kammerkonstante genannt), die Lage des Hauptpunktes in der Bildebene und die restliche

radiale Verzeichnungsfunktion. Der Hauptpunkt ist der Durchstosspunkt der optischen Achse des Objektives mit der Bildebene; er ist definiert durch den Schnittpunkt der Verbindungslinien der Rahmenmarken. Die Bildweite ist der Abstand des bildseitigen Projektionszentrums vom Bildhauptpunkt. Bei den heutigen Messobjektiven ist die radiale Verzeichnung vernachlässigbar klein, von unsymmetrischen Verzeichnungsresten ist eine Messkammer völlig frei. Die bekannten Daten der inneren Orientierung gestatten jederzeit die geometrische Rekonstruktion des Aufnahmestrahlenbündels und sind damit die Voraussetzung für die photogrammetrische Vermessung.

Die Lage der beiden Aufnahmekammern zueinander und zum Objekt wird als äussere Orientierung bezeichnet. Für Stereometerkameras mit fester bekannter Basis, zueinander parallelen und zur Basis senkrechten Aufnahmeachsen ist daher auch die äussere Orientierung als gegeben vor auszusetzen. Für die Rekonstruktion des Strahlenganges und damit der genauen Form des auf beiden Aufnahmen abgebildeten Objektes sind alle Voraussetzungen vorhanden. Die Aufnahme richtung gegen das Lot ist auch durch Einspielen der Röhrenlibellen an der Kammer festgelegt. Mit einer Bussole kann ausserdem die Orientierung gegen magnetisch Nord bestimmt werden.

1.2.5. Räumliche Betrachtung der Aufnahmen

Die erste räumliche Betrachtung der Aufnahmen erfolgt unter dem Spiegelstereoskop (Photo 3). Man verwendet hierzu entweder die Papierkopien der Aufnahmepaare oder Vergrösserungen bis 13 x 18 cm. Das Stereoskop dient der Durchmusterung des Bildinhaltes und den Dispositionen für die Auswertung.

1.2.6. Die Auswertegeräte

Für die räumliche Auswertung werden besondere Auswertegeräte verwendet (Photo 4), die die zentralperspektivische Geländeaufnahme in die Orthogonalprojektion des Planes verwandeln. Sie beruhen auf der Rekonstruktion des Aufnahmevorganges und dienen der Herstellung eines geometrisch ähnlichen Geländemodells, das durch Abtasten mit einer räumlich erscheinenden Mess-

marke ausgemessen werden kann. Durch optisch-mechanische Führung wird die Bewegung der Messmarke im gewählten Massstab grundrissrichtig auf einen Zeichentisch übertragen. Die Höhe über einer frei gewählten Bezugsebene kann an einer Höhenskala abgelesen werden.

Zur Entnahme einer grösseren Anzahl von Modellkoordinaten dient ein elektrisches Koordinatenregistriergerät. Eine Schreibmaschine registriert eine frei wählbare Punktnummer und die sechsziffrigen Modellkoordinaten x, y, z auf 1/100 mm im Modellmassstab. Der angeschlossene Karten- oder Streifenlocher stanzt die Werte synchron auf Lochkarten oder Lochstreifen.

Meine Auswertungen konnte ich an den Instrumenten des Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich und der Schweizerischen Schule für Photogrammetrie Operateure in St.Gallen ausführen. Es standen dort die zweckmässigsten Einrichtungen zur Verfügung. Für Senkrechtbilder ist es in erster Linie der Autograph WILD A-9. Modelle, bei denen die Aufnahmeachsen um 30 oder 60° geneigt waren, konnten nur am A-40 mit Transformationsgetriebe grundrissrichtig kartiert werden. Bei beiden Geräten erfolgt die Koordinatenregistrierung direkt am Modell, deshalb sind die Koordinatenwerte geneigter Aufnahmen bei der Verarbeitung nachträglich auf den Normalfall der Senkrechtaufnahme zu transformieren.

1.2.7. Genauigkeiten

Der Fehler bei der Ausmessung ist im wesentlichen nur abhängig von der Aufnahmedistanz. In der Aerophotogrammetrie rechnet man für Senkrechtaufnahmen und bei signalisierten Punkten mit einem mittleren Höhenfehler von ± 0.1 ‰ der Flughöhe über Grund, bei gut identifizierbaren Punkten mit einem mittleren Höhenfehler von ± 0.2 ‰. Diese Erfahrungszahlen lassen sich für die Verhältnisse des Nahbereichs ohne weiteres übernehmen; das bedeutet bei einer Aufnahmehöhe von 2 m über Boden eine Genauigkeit von $\pm 0.4 - 0.6$ mm in der Höhe z . Für die Lagekoordinaten x, y entlang einer Profillinie gelten praktisch die gleichen Werte.

1.2.3. Verarbeitung der Messdaten

Alle aufwendigen Rechenprozesse wurde auf IBM-Anlagen des Rechenzentrums der Universität Zürich ausgeführt. Für kleinere Operationen verwendete ich einen Tischrechner DIEHL Combitron S und eine Hewlett Packard HP 35.

2. Das Erfassen der formalen Merkmale von Solifluktiionsformen

Schon von blossen Auge erkennt man an Struktur- und Texturböden gewisse Regelmässigkeiten. Sie können sich an einer einzeln betrachteten Form als auffallende Individuenmerkmale äussern, ausserdem springt im Gesamtverband die Art der Vergesellschaftung der Einzelformen ins Auge.

Auf der Suche nach dem Entstehungsmechanismus und den Gründen der regelhaften Ausbildung und Anordnung sind bislang die chemischen und physikalischen Aspekte gründlich, wenn auch noch nicht vollständig, erforscht worden und haben sich in vergleichbaren und gegenseitig korrelierbaren Daten niedergeschlagen. Ueber die formale Oberflächenausbildung gemusterter Böden bestehen meines Wissens aber noch keine derartig vergleichbaren Werte, wenn man von Angaben wie Hangneigung oder Grösse der einzelnen Formen absieht. Horizontale Ausdehnungen lassen sich mit den üblichen Mitteln noch verhältnismässig zuverlässig messen, Höhenwerte an unebenen Oberflächen dagegen sind Schätzfehlern beim Ablesen des Massstabes unterworfen; oft fehlen zur Messung auch exakt definierte Bezugspunkte. Das Auge wird von dominierenden Geländelinien der nächsten Umgebung beeinflusst. Versucht man beispielsweise an einem Steinring die Höhendifferenz zwischen dem höchsten Punkt des konvexen Fein-erdezentrum und dem Uebergangspunkt zum Steinrahmen zu bestimmen, so ist es kaum möglich, von Auge die Höhe des Zentrums horizontal auf den im tieferen Punkt stehenden Massstab zu projizieren. Einen gewissen Zuwachs an Genauigkeit kann man durch Verwendung einer Wasserwaage erreichen. Der aus der Ungenauigkeit dieses Hilfsmittels resultierende Fehler bleibt bezüglich der horizontalen Distanz prozentual zumindest annähernd konstant.

Um aber eine repräsentative Anzahl dieser und ähnlicher Werte zu messen, wird man bei Feldaufnahmen sehr viel Zeit aufwenden müssen - Zeit, die für

andere, feldgebundene Untersuchungen verlorengeht. Es lässt sich dabei auch kaum vermeiden, dass die Form durch Trittspuren verändert oder zerstört wird.

Wenn diese Messart sich zum Erfassen einzelner Grössenverhältnisse gerade noch eignet, so erreicht sie ihre Grenze, sobald es darum geht, Unebenheiten aufzunehmen: Die eigenartig regelhaften Aufwölbungen und Einsenkungen an gemusterten Böden waren bisher rein deskriptiv dargestellt worden, manchmal ergänzt durch Zeichnungen und Photos. Alle Beschreibungen unterliegen auch bei grösster Sorgfalt der Subjektivität des Autors. Wie bei den bekannten optischen Täuschungen beeinflussen die Umgebungsverhältnisse das Empfinden für die Einzelform. Dazu kommt, dass selbst eine genaue und nuancierte sprachliche Wiedergabe des formalen Charakters einer Fläche vom Leser oft anders bewertet wird, als der Autor es verstanden haben will. Diese Unsicherheiten haben die gleiche Ursache: Es fehlt eine verbindliche Vergleichsbasis.

Ich versuchte mit dieser Arbeit, ein Verfahren auszuarbeiten, mit dem die charakteristischen, formtypischen Merkmale vergleichbar dargestellt werden können.

Die Photogrammetrie ermöglicht, Lage und Form eines Aufnahmegegenstandes richtig wiederzugeben. Es kann dabei linien- und punktweise kartiert oder Punkt für Punkt nach Koordinaten registriert werden. Die zeichnerische Darstellung des Grundrisses - mit Umrisslinien von abgrenzbaren Gegenständen und Höhenkurven - ist bei den vergleichsweise kleinmassstäbigen topographischen Karten anschaulich; der kleine Bild- und Auswertemassstab generalisiert den Bildinhalt, was hier durchaus erwünscht ist. In der Nahbereichsphotogrammetrie sind zwar Interpretations- und Messbarkeitsgrenzen vom Bildmassstab ebenso abhängig wie bei Luftaufnahmen. Der grosse Massstab im Nahbereich hingegen und die starke Vergrösserung im Auswertegerät können unter Umständen - wegen der Fülle an Details - die Auswertung - besonders mit Höhenkurven - erschweren. Der Rahmen eines Steinringes beispielsweise erscheint in dieser Darstellungsart mit Höhenkurven und Zeichnung der Steinkanten völlig unübersichtlich und nicht mehr lesbar.

Sobald grosse Höhenunterschiede in dichter Folge auftreten und noch sichtverdeckende Ueberhänge dazu kommen, muss bei grossmassstäblicher Auswertung von der üblichen Kartierungsart abgesehen werden. Nur wenn eine Fläche mehr oder weniger glatt ist und eine "zusammenhängende" Oberfläche

aufweist, eignet sich die Linienkartierung im Grundriss.

In der Photogrammetrie kennt man daneben das Verfahren der Einzelpunktregistrierung, wie es besonders für Kubaturbestimmungen im Bauwesen Anwendung findet. Soll die Charakteristik eines Oberflächenverlaufes mathematisch ausgedrückt werden, so stehen mit der punktweisen Registrierung zwei Wege offen. Man kann über die Fläche in beliebiger Maschenweite ein Raster legen und jeweils an den Kreuzungspunkten der Rasterlinien die drei Raumkoordinaten festhalten. Mathematisch kann man im dreidimensionalen Raum den so gegebenen punktweisen Beobachtungen eine Oberfläche anpassen, bei der die Differenz zwischen beobachteten und berechneten Flächenwerten möglichst klein sein soll (DORIGO, 1972, S. 8).

Für meine Untersuchungen an den mehr oder weniger regelmässigen Formen der gemusterten Böden wählte ich ein einfacheres, aber den Formen besser angepasstes Verfahren. Statt Punkte nach einem Raster aufzunehmen, legte ich Profillinien über die Oberflächen. Runde Formen wie Steinringe und Erdknospen wurden mit sternartigen Radialprofilen überzogen. Bei Objekten mit deutlich ausgeprägtem Längsverlauf erhielten Querprofile eine Anordnung senkrecht zur Formlängsachse.

Aus der Verarbeitung der so gewonnenen Werte resultierten schlussendlich mathematisch definierte Kurven. Quadratische Parabeln haben sich nach etlichen Voruntersuchungen als sehr geeignet erwiesen, den Charakter regelhafter Oberflächenformen gut typisierend und doch einfach auszudrücken. Auf die Registrierung einzelner markierter Punkte, um deren Hebung und Lageänderung festzustellen, wird im zweiten Teil dieser Arbeit (Bewegungsmessungen) eingegangen.

3. Beispiel einer Auswertung und Verarbeitung der Daten

Das Vorgehen bei der Untersuchung soll am Beispiel eines Steinringes gezeigt werden. Manche Aspekte werden ausführlich behandelt, andere nur in den Grundzügen aufgezeigt, da auf sie später im Zusammenhang mit den Untersuchungsergebnissen eingegangen wird.

- 1) Das Bildpaar ist nach der den Aufnahmestatus herstellenden Einpassung im Autographen räumlich zu betrachten. Die gegenüber dem normalen Augenabstand verlängerte Aufnahmebasis wirkt sich in einer Ueberhöhung des Modells aus. Der vergrößerte Winkel, unter dem sich die Projektionsstrahlen eines Punktes schneiden, verbessert die Höhengenaugigkeit bei der Ausmessung. Wegen der geschlossenen Rundform des Steinrings werden die Profile, die Verschneidungslinien von Senkrechtebenen und der Oberfläche, radial angelegt. Zuerst gilt es, das Zentrum - den Ausgangspunkt für die sternförmig auseinanderlaufenden Geraden (im Grundriss) - also die Mitte des Steinrings, zu finden.
- 2) Zu diesem Zweck wird zunächst die Grenzlinie zwischen dem Feinerdezentrum und dem Steinrahmen in möglichst grossem Massstab (1:10 oder 1:5) auf dem Zeichentisch kartiert. Auf den mindestens zehn an diese annähernd kreisförmige Linie eingezeichneten Sehnen werden ihre Mittelsenkrechten errichtet. Bei einem Kreis fallen die Schnitte bekanntlich in einem Punkt, dem Zentrum, zusammen. In der vorliegenden Arbeit wird innerhalb der immer eng beieinander liegenden Menge der Schnittpunkte der "mittelste" Punkt graphisch geschätzt. (In vorausgegangenen Ueberprüfungen zur Genauigkeit dieser Art Fixpunktbestimmung halfen mir vier Kollegen, die unabhängig voneinander Mittelpunktsfestlegungen der beschriebenen Art vornahmen. Die rechnerisch ermittelten Fehler an den Radiuslängen von den Mittelpunkten zur erwähnten Grenzlinie ergaben untereinander nur so minime Abweichungen ($< 2\%$ der durchschnittlichen Radiuslängen), dass sich diese Mittelpunktsbestimmung für die Messungen an den Rundformen ohne weiteres übernehmen liess).
- 3) Im Mittelpunkt kann sodann auf dem Autographen-Zeichentisch das Zentrum der Radialprofile fixiert werden. Diese Linienschablone ist auf Transparentfolie gezeichnet, die Zentriwinkel zwischen benachbarten Geraden

betragen konstant 15° . Somit ergeben sich 24 Profillinien über die Form. (Bei sehr kleinen Formen wird nur jede zweite oder dritte Linie abgefahren, da die Punkte sonst zu eng beieinander liegen).

- 4) Ein sogenanntes Profiloskop gestattet die Messmarke den im Grundriss aufgetragenen Profillinien nachzuführen. Diese Zusatzeinrichtung am Zeichentisch wirft das Bild eines kleinen Ringes, dessen Bewegungen mit den Horizontalverschiebungen der Messmarke im Modell korrespondieren, über Spiegel ins unmittelbare Blickfeld des Auswerterers. So kann man jederzeit die Deckung von Ringmarke und Profillinie herstellen.

Anfang jedes Einzelprofils ist das Formzentrum, der Fixpunkt, der zur Kontrolle bei jeder Linie registriert wird. Die Registrierung verläuft folgendermassen: Entlang der vorgegebenen Geraden wird die Messmarke (bzw. die Ringmarke des Profiloskops) zu dem gewünschten Punkt der Linie geführt (x- und y-Richtung) und dann auf die Oberfläche der Form aufgesetzt (z-Richtung). Ein Knopfdruck löst die elektrisch-mechanische Registrierung aus: Kontaktwerke greifen elektromagnetisch die Modellkoordinaten ab. Diese werden in Impulse umgesetzt, welche das Ausdrucken der Werte über eine elektrische Schreibmaschine und das Stanzen der Lochkarten steuern. Dazu wird noch eine vorgängig eingetastete Punktidentifikationsnummer gefügt.

Es geht bei der Profilaufnahme besonders darum, schon den Verlauf der Einzellinien möglichst typisch festzuhalten. So werden alle höhenmässigen Unstetigkeitsstellen (einzelne im Feinerdekörper eingebettete Steine, "Klüfte" zwischen den Steinen und "Kämme" derselben im Rahmen) erfasst. Aber auch sanftere Krümmungen ohne abrupte Sprünge erhalten eine dichte Folge registrierter Punkte aufgesetzt. (Man mag vielleicht einwenden, die Auswahl der Punkte erfolge subjektiv. Das trifft zu, soweit es um die Entscheidung geht, wann ein Einzelpunkt gesetzt wird. Aber die Endform der Gleichung einer die Oberfläche repräsentierenden "durchschnittlichen" Profillinie basiert auf Einzelbeobachtungen längs vieler Linien. Beim beschriebenen Vorgehen ist es schlechthin unmöglich, sich bei einem Profil an vorherige zu erinnern und den Gang einer ganzen Linie durch "gezieltes" Registrieren zu beeinflussen).

Am Ende einer Ausmessung liegen für die Form 24 Einzelprofile vor. Jede dieser Linien ist je nach dem Grad ihrer "Stetigkeit" von bis zu 35 Koordinatentripeln gestützt. Um ihren Verlauf erst einmal graphisch anschaulich darzustellen, bedarf es einer Drehung in eine Bezugsebene aller

zwischen den radialen Senkrechtebenen (durch die Profillinien) und der Formoberfläche entstandenen Schnitten. Ich wählte der Einfachheit halber die durch den Mittelpunkt der Strahlen in Richtung der positiven x-Achse verlaufende Hälfte einer Vertikalebene. Die Horizontalabstände der Punkte vom Zentrum können einfach bestimmt werden: $d_{ni} = \sqrt{x_{ni}^2 + y_{ni}^2}$, wobei $n = 1, 2, \dots, 24$ für die Profilnummer und $i = 1, 2, \dots, m$ (Anzahl Punkte einer Profillinie) für die Punktnummer gesetzt wird. Das bewirkt gleichsam ein fächerartiges Zusammenklappen der Kurven in die Bezugsebene. Es resultiert noch eine Erleichterung anschließender Berechnungen, weil die Profillinien nur durch die Stützstellen (Abstände in horizontaler Richtung vom Zentrum, neu mit x_{ni} bezeichnet) und die zugehörigen Stützwerte (relative Höhenunterschiede vom Zentrum, z_{ni}) ausgedrückt werden (gleiche Indizierung wie oben).

- 5) Um im graphischen Bild Unregelmässigkeiten zurücktreten zu lassen, werden alle Punktefolgen einer Glättung unterzogen, getrennt nach Feinerdezentrum und Rahmen. Die nachstehende Formel bringt bei zehnmaliger Wiederholung eine gute Egalisierung extremer Höhen und Tiefen. Anfangs- und Endpunkte einer Teilkurve bleiben jeweils fest. Die aus der Glättung hervorgegangenen neuen Höhen werden als Ausgangswerte der folgenden genommen. Aus Gründen der Einheitlichkeit und visuellen Vergleichbarkeit belies ich die Iterationszahl immer konstant und erreichte so einen guten Kompromiss zwischen Verdeutlichung einer Verlaufstendenz und Generalisierung durch das "statistische Bügeleisen" (FLIRI, 1969, S. 25).

Die Glättung (siehe dazu Figur 3)

Die Punkte $P_i (x_i, z_i)$ sind gegeben durch die Horizontalabstände vom Zentrum und die Höhendifferenz z_i zu ihm.

Bei der Glättung erhält die Höhe des mittleren von drei Punkten (z_i) das Gewicht 3. Die beiden benachbarten z_{i-1} und z_{i+1} werden zusammen mit 2 gewichtet. Die Aufteilung auf die beiden Punkte richtete sich proportional nach ihren horizontalen Abständen vom mittleren Punkt (wegen der unterschiedlichen Intervalle in x, die sich bei der Auswertung ergeben haben).

Die Glättungsformel für die Höhe des jeweilsmittleren Punktes lautet:

$$z_{i_{\text{neu}}} = \frac{\frac{2}{x_{i+1} - x_{i-1}} \left[(x_i - x_{i-1}) z_{i-1_{\text{alt}}} + (x_{i+1} - x_i) z_{i+1_{\text{alt}}} \right] + 3z_{i_{\text{alt}}}}{5}$$

für $i = 2, 3, \dots, (m-2), (m-1)$ (Anfangs- und Endpunkt fest)

Nach Berechnung aller i Punkte werden die neuen Höhen $z_{i_{\text{neu}}}$ als $z_{i_{\text{alt}}}$ gesetzt, usw., bis die Kurve die Glättung 10-mal durchlaufen hat.

Die separate Behandlung der Feinerde und des Steinrahmens bewahren durch Festhalten von Anfangs- und Endpunkt die Charakteristik des Gesamtprofils mit dem deutlichen Knick an der Uebergangsstelle.

- 6) Der nächste Schritt besteht im Finden einer die Punktefolgen approximierenden mathematischen Funktion. Diese sollte die Forderung nach guter Korrelation zur gegebenen Profillinie erfüllen und ausserdem einen möglichst einfachen Aufbau haben; dem entspricht das Polynom 2. Grades, die quadratische Parabel $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$. Die Berechnung der Schmiegeparabeln erfolgt für die gleichen Profilstücke getrennt wie vorhin die Glättung; ein radiales Profil über einen Steinring wird also ersetzt durch zwei Parabeln, über die Feinerde und über den Steinrahmen.

Die Berechnung der Ausgleichs- und Regressionsparabeln erfolgt nach der Methode der kleinsten Quadrate, das heisst : die Parabeln sind so zu legen, dass die Summe der Quadrate aller Vertikalabstände der vorgegebenen Punkte von der Parabel ein Minimum wird.

Bestehende Computerprogramme reduzieren die Zeit für Regressionsrechnungen auf ein Mass, das den Aufwand selbst bei umfangreichen Arbeiten in vernünftigen Grenzen hält. Nach kleinen Aenderungen am Programm POLRG (aus der Scientific Subroutine Package (SSP) von IBM) berechnete dieses die Parabelkoeffizienten a_0, a_1, a_2 sowie die Korrelationskoeffizienten r als Mass der Korrelation zu den eingegebenen Werten x_i und z_i . Zudem liess sich die Randbedingung einführen, dass bei Steinringen und anderen Rundformen die Tangenten über der Feinerde im Formmittelpunkt horizontal verlaufen solle.

Die den verschiedenen Ausbildungen gemusterter Böden angepassten Berechnungarten sind in den folgenden Kapiteln vor die Untersuchungsergebnisse gestellt.

C. DIE OBERFLÄCHENFORMEN VON FROSTGEMUSTERTEN BÖDEN

In der Zielsetzung ist darauf hingewiesen, dass mit Hilfe der Stereophotogrammetrie die typischen Oberflächenformen frostgemusterter Böden zu erfassen und dann durch mathematisch definierte Kurven auszudrücken sind.

Zunächst war abzuklären, welche Kriterien die Auswahl der Aufnahmeobjekte bestimmen sollten. Ich verglich zu diesem Zweck beschriebene Feldbeobachtungen und Definitionen von verschiedenen Autoren und fasste die für eine bestimmte Form einheitlich als typisch aufgeführten äusseren Merkmale zusammen. Auf diese Weise kristallisierten sich "Standardtypen" heraus, die als formale Leitbilder die Auswahl der Aufnahmeobjekte im Feld festlegten. Es war bei grossflächigen Vorkommen kein Problem, aus der Vielzahl der Formen diejenigen Einzelexemplare auszusuchen, die dem Idealtyp am ehesten entsprachen (z.B. Steinringe auf dem mehrere Hektaren grossen ebenen Strukturbodenfeld Sverdruphamaren bei Longyearbyen, Spitzbergen; oder Erdknospen auf dem Sattelplateau des Kilimanjaro), mit anderen Worten überall dort, wo die Voraussetzungen optimaler Ausbildung erfüllt waren.

1. Grossformen

1.1. Steinringe

MEINARDUS beschreibt 1912 in seinen "Beobachtungen über Detritussortierung und Strukturböden auf Spitzbergen" von ihm "Polygonböden" genannte Musterungen sehr anschaulich. Aus den diesbezüglichen Photos zu schliessen, gelten die Ausführungen auch für "Steinringe" (die von MEINARDUS als "Steinstreifen" benannten Umrahmungen werden heute als "Steinrahmen" bezeichnet). Die Steinringe weisen nach seiner Beschreibung ein dicht gepacktes Gemenge aus Blöcken von Faust- bis Kopfgrösse auf, umschliessen eine dunkelgefärbte, weiche feuchte Bodenkrume, in der kleinere Gesteinsbrocken zerstreut sind. FURRER (1959, S. 277 f.) erkennt Steinringe als kreisförmige, gelegentlich ovale Steinwülste von durchschnittlich 50 cm Breite, die Feinerdeflächen von 1 bis 2 m Durchmesser umgrenzen; die Wand der Steinrahmen gegen die Feinerde ist mit kleinen Steinen ausgekleidet, während die grössten Steine mehr in Rahmenmitte zu finden sind.

Aus Photographien und gezeichneten Profilschnitten auch anderer Autoren ist allgemein zu erfahren, dass

- 1) ein Steinring durch deutliche Abgrenzung zwischen zentraler Feinerde und umgebendem gröberblockigem Steinrahmen ausgezeichnet ist;
- 2) das Feinerdezentrum sich i.a. konvex erhebt, ebenso der Rahmenwulst;
- 3) bei annähernd horizontaler Fläche die kreisförmige Ausbildung vorherrscht und erst nach Ueberschreiten eines gewissen Hangneigungswinkels die Tendenz zur Ausbildung von ovalen und gestreckten Formen sich einstellt.

1.2. Die photogrammetrischen Aufnahmen

In der Beschreibung der Aufnahmeeinrichtung (Teil B, Absatz 1.2.1.) habe ich darauf hingewiesen, dass in den meisten Situationen mit senkrechter Aufnahmerichtung gearbeitet werden konnte (Photo 2). Ausnahmen traten lediglich bei Verwendung des serienmässigen Holzstatives auf, wo sich geneigte Aufnahmen aufdrängten, um die Mitabbildung der Stativbeine auszuschliessen. Wenn beim Spezialstativ mit hängender Kamera selbst die Maximalhöhe nicht mehr ausreichte um die gewünschte Fläche auf einem Stereobildpaar abzubilden, wurde die Kamera (= Aufnahmerichtung) um 30° geschwenkt. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel einer solchen Aufnahme, bei der eine geringfügige Verdeckung durch die Stativbeine in Kauf genommen werden musste.

1.3. Das Registrieren der Profile

1.3.1. Senkrechtaufnahmen *) (vgl. S. 17)

Entlang der 24 vom geschätzten Formzentrum mit 15° Zwischenwinkel radial auseinanderstrebenden Geraden (aufgezeichnete Profillinien-schablone in der x-y-Ebene) wurde jeder Steinring mit dem Profiloskop abgefahren. Unstetigkeitsstellen und Sprünge an der Oberfläche, aber auch gleichmässige Krümmungen, erhielten registrierte Punkte in teils sehr dichter Folge aufgesetzt. Jedes Radialprofil teilte sich in 2 Abschnitte, nämlich Feinerde und Steinrahmen, die dann bei der Glättung und Angleichung durch die Parabeln separat behandelt wurden (siehe Abschnitt 1.4. dieses Kapitels).

1.3.2. Geneigte Aufnahmen

Geräte, die mit einem Transformationsgetriebe versehen sind, erlauben auch bei geneigten Aufnahmen eine grundrissrichtige Kartierung. Die Betrachtung der Schrägaufnahmen erfolgt wie bei Senkrechtbildern; dabei erscheint der Bildinhalt um den Winkel zwischen dem Lot und der Aufnahmerichtung geneigt. Das Koordinatensystem bleibt bei der Registrierung das gleiche orthogonale mit lotrechter Höhenachse z. Die Einflüsse der zentralperspektivischen Schrägaufnahme wirken sich sowohl in y-Richtung (in der die Aufnahmeachse geneigt wurde), also senkrecht zur Basis (x-Richtung) als auch in der Höhe z aus (Fig. 4).

Dank dem Transformationsgetriebe am Kartiergerät WILD A-40 konnte wenigstens die Grenzlinie zwischen Feinerde und Steinrahmen grundrissrichtig kartiert werden. Die Festlegung des Formmittelpunktes und das Abfahren der Profile gestaltete sich dann gleich wie bei Senkrechtaufnahmen.

*) Die Mehrzahl der Stereoautographen ist dazu eingerichtet, die Zentralprojektion der Photos nur bei Senkrecht- oder Horizontalaufnahmen in die Orthogonalprojektion des Planes umzuwandeln. Unter "Senkrechtaufnahme" versteht man auch Bilder, deren Aufnahmerichtungen wenige Grade von der Vertikalen abweichen. Diese Differenzen lassen sich in beschränktem, instrumentenabhängigem Mass bei der Orientierung eliminieren und gestatten eine Auswertung wie bei strengen Senkrechtaufnahmen.

Vor dem nächsten Schritt, der Glättung, mussten alle registrierten Punkte in das Orthogonalsystem übergeführt werden, das die Geländebezugsebene E (vgl. Fig. 5) als Grundrissebene hat, was einer Drehung um den Neigungswinkel zwischen Aufnahmerichtung und der Vertikalen um die x-Achse entspricht.

1.4. Die Glättungsabschnitte

Alle Radialprofile über Steinringe wurden nach formalen Gesichtspunkten in zwei Stücke geteilt: der erste Abschnitt reichte von der Mitte der Feinerdefläche bis zu deren äussersten Rand, dem Uebergang zum Steinrahmen; der zweite Kurventeil setzte hier an, überzog den Rahmen und endete an dessen Aussenseite (Uebergang zum umgebenden Steinpflaster, zur umliegenden Feinerde oder einem benachbarten Steinrahmen). Die Glättung der Kurven wurde nach den Formeln von S. 21 vorgenommen. Aus den Berechnungen resultierten für jedes Radialprofil die horizontalen Entfernungen der Punkte vom Zentrum (x_{ni}) und ihre diesbezüglichen Höhen (z_{ni}), wobei n = Profilnummer und i = Punktnummer auf einer Profillinie sind.

1.5. Regressionsparabeln an die Teilkurven

Das Computerprogramm berechnete nach Eingabe der Koordinatenwerte x_{ni} und z_{ni} für jedes geglättete Teilstück der Profillinien die bestapproximierenden quadratischen Parabeln, wobei als Randbedingung für die Kurven über der Feinerde galt, dass sie im Formmittelpunkt horizontale Tangenten haben sollten - eine Forderung, die angesichts der "Kreissymmetrie" des Grundrisses der Gesamtform sicher aufgestellt werden kann.

1.6. Ergebnisse

1.6.1. Die Oberflächendimensionen der ausgemessenen Steinringe (Vergleich ----- mit Werten aus der Literatur) -----

Ueber die Dimensionen polarer Steinringe berichtet MEINARDUS (1912, S. 1-3), dass die rundlichen, 10 bis 20 m² grossen Feinerdeflächen von 30 bis 50 cm breiten "Steinstreifen" (= "Steinrahmen") umschlossen sind, welche die inneren Flächen um etwa 5 cm überragen, die äussere Umgebung aber um etwa 30 cm. Aus den - wahrscheinlich geschätzten - Flächenwerten ergeben sich unter Annahme der Kreisförmigkeit Feinerdedurchmesser von 3.5 bis 5 m.

Zu den hochpolaren Strukturböden Spitzbergens und Grönlands bemerkt TROLL (1955, S. 614 f.): "Die weitaus vorherrschenden Formen der ... Steinringe ... sind "Grossformen" mit Durchmessern ... von einem bis zu vielen Metern..."

FURRER (1959, S. 277 und 1965, S. 12) dagegen führt aus Spitzbergen im Kongsfjord bei Ny Ålesund beobachtete Feinerdedurchmesser von 0.5 bis 2 m auf. (Abb. 6 und 7). Er schliesst dabei das Vorkommen von grösseren Formen nicht aus. Auf die in obigen Arbeiten erwähnten Verhältnisse zwischen Feinerdedurchmesser und umgebendem Steinrahmen wird weiter unten eingegangen.

Ueber die Einzelform eines Steinringes aus den Alpen (Fimberpass, 2630 müM) schreibt GRAF (1971, S. 29): "Sie kann an ihrem breiten, kreisförmigen Wall erkannt werden. Hier sind grobe Gesteinstrümmen dicht gepackt, ihr 20 bis 30 cm hoch aufgewulsteter Ring hebt sich deutlich vom Feinerdezentrum ab." Der Durchmesser dieses Steinrings betrug 2 m, die Breite des Ringes ca. 50 cm.

Andere Beispiel ähnlich "arktischer Grösse" gibt FURRER (1965, S. 28) von verschiedenen alpinen Vorkommen an. Die wie bei GRAF auf die Rahmenmitten bezogenen Durchmesser betragen 60 bis 220 cm, die Rahmenbreiten schwanken zwischen 25 und 100 cm. Etwas kleinere Ringe hat POSER (1954, S. 165) in den Gletschervorfeldern des Hornkeeses und des Schwarzensteinkeeses gefunden. Er nennt Durchmesser von 35 bis 120 cm.

Leider ist es kaum möglich, die oben aufgeführten Zahlen verschiedener Autoren miteinander zu vergleichen. Häufig werden keine Angaben über die Bezugspunkte der Messungen gemacht; es fehlen nämlich bis heute einheitliche Konventionen über die Ausgangspunkte für Dimensionsbestimmungen, die man als gegeben voraussetzen könnte.

FURRER (1965, S. 12) bestimmt die Durchmesser von Steinringen von Rahmenmitte zu Rahmenmitte über das Zentrum der Form und begründet dies damit, dass der Feinerdedurchmesser häufig keinen repräsentativen Wert liefert; "Dies zeigt sich bei nicht ausgereiften Formen, wo die Oberfläche unvollständig aussortiert ist - noch viele Steine trägt - , trotz deutlich entwickeltem Rahmen." Bei Messungen im Feld wird "Mitte" und "höchster Punkt" des Steinrahmens intuitiv an der selben Stelle angenommen (gemäss mündlicher Mitteilung von Prof. Furrer). Wie aus den in Fig. 6 dargestellten Radialprofilen über Steinringe zu entnehmen ist, fallen jedoch die Höhenmaxima der Rahmen kaum mit deren Mitte zusammen. Sie können sowohl gegen die Feinerde hin, als auch weiter zu Rahmenaussenseite verschoben sein.

Bei Steinringen und anderen kreis- oder ellipsenartig ausgebildeten Oberflächenmustern eignen sich meiner Ansicht nach für Dimensionsmessungen folgende Bezugspunkte in einer vertikalen Schnittebene durch das Formzentrum;

- a) der Uebergang von der Feinerde zum Steinrahmen
- b) das Zentrum der Feinerde (i.a. der höchste Punkt der Feinerde)
- c) der höchste Punkt des Steinrahmens
- d) der periphere Punkt des Steinrahmens

An die Grenze zwischen Feinerde und Rahmen setze ich den Nullpunkt, auf den sich alle Höhenmasse beziehen. Ausgangspunkt aller Horizontaldistanzen ist das Formzentrum. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass fast alle relativen Höhendifferenzen bezüglich des Nullpunktes positiv ausfallen, ebenso wie die von der Formmitte aus gemessenen Horizontaldistanzen.

Die Bestimmung der Bezugspunkte

Das folgende Beispiel soll zeigen, wie die soeben aufgeführten Bezugspunkte gewonnen werden und welche Abweichungen sich zwischen den Werten der photogrammetrischen Ausmessung und den analogen Punkten der Schmiegeparabeln ergeben.

Während der photogrammetrischen Auswertung wird entlang der 24 Profillinien eine Anzahl Punkte in Raumkoordinaten registriert. Nach dem in Teil B, Kap. 3 beschriebenen Einklappen der Profile in die gemeinsame, in positiver x-Richtung

stehende, Vertikalebene erfährt jede Linie - nach Feinerde und Rahmen getrennt - eine zehnmäßige Glättung. Drei Punkte bleiben auch bei der Glättung fest: der Formmittelpunkt, der Grenzpunkt zwischen der Feinerde und dem Rahmen, sowie der periphere Punkt des Rahmens. Nun berechnet man aus den Werten der 24 Profile für die Lage und Höhe der letztgenannten zwei Punkte je die arithmetischen Mittel und die Standardabweichung. Für den gemeinsamen Ausgangspunkt aller Linien, das Formzentrum, weichen die registrierten Koordinaten nur geringfügig voneinander ab. Sie liegen innerhalb des mittleren Fehlers der Auswertemethode und sind bei Aufnahmedistanzen von 2 m kleiner als 0.5 mm.

Ueber der Feinerde werden die 24 Profillinienabschnitte durch Parabeln mit der Randbedingung approximiert, dass die Tangenten im Formzentrum horizontal verlaufen. Ausgleichskurven an den Rahmen berechnen sich als freie Regressionsparabeln nach der Methode der kleinsten Quadrate. Aus den Koeffizienten der je 24 Einzelkurven bilde ich die arithmetischen Mittel und nenne die so entstehenden beiden Einzelkurven im weiteren normierte Parabeln des Steinrings. Sie typisieren den Oberflächenverlauf der Steinringe und bestimmen endgültig die Lage und Höhe der oben aufgeführten drei Punkte. Ausserdem ergibt sich aus der normierten Rahmenparabel die Lage des höchsten Rahmenpunktes.

Gegenüber dem ursprünglich angenommenen Ausgangspunkt für die Höhe des Formzentrums liefert die Ausgleichung die endgültige Höhe, die durch das konstante Glied der normierten Zentrumsparabel gegeben ist.

Nach Einsetzen der gemittelten Distanz zum peripheren Rahmenpunkt in die Gleichung der Rahmenparabel erhält man seine neue Höhe. Im allgemeinen sind die Kurven über den Rahmen stärker gebogen als über der Feinerde. Die Abweichung vom anfänglich gemittelten Höhenwert ist umso grösser, je steiler die Parabel an der Rahmenseite abfällt.

Der Schnittpunkt *) der beiden normierten Parabeln bestimmt die neue Lage und Höhe des Uebergangspunktes, an dem Feinerde und Steinrahmen zusammentreffen.

*) In der Auflösungsformel für quadratische Gleichungen ist dies der Ausdruck mit der positiven Wurzel der Diskriminante ($b^2 - 4ac$).

Die Abweichungen der aus den normierten Parabeln berechneten Neuwerte von den entsprechenden gemittelten Registrierwerten liegen bei allen Steinringen innerhalb der durch die Methode gegebenen Streuung.

Das Verhältnis Feinerderadius zu Steinrahmenbreite

ELSASSER (1968, S. 12) nennt für das durchschnittliche Verhältnis von Steinringdurchmesser zu Rahmenbreite den Wert von 2.8 : 1 bei den von ihm untersuchten Formen in den Schweizer Alpen. Er bestimmt den Durchmesser der Ringe von Rahmenmitte zu Rahmenmitte. Aus Spitzbergen berichtet FURRER (1965, S. 12) über ähnliche Verhältniszahlen und vergleicht sie mit den entsprechenden Messungen an Steinpolygonen, wo sich ein Verhältnis von 4 : 1 ergibt.

Wie weiter oben ausgeführt ist (Teil C, Absatz 1.6.1.), geben die Rahmenmitten keine eindeutigen Bezugspunkte für Dimensionsmessungen ab. Ich bevorzugte bei den Vergleichen die horizontalen Längen der gemittelten Feinerderadien und die durchschnittlichen Rahmenbreiten.

Prozentuale Verhältnisse zwischen Feinerderadien und Rahmenbreiten

Tabelle 1:

Spitzbergen

Feinerderadius Rahmen

79	:	21
60	:	40
57	:	43
54	:	46
52	:	48
51	:	49
50	:	50
49	:	51
44	:	56
36	:	64

Alpen

Feinerderadius Rahmen

59	:	41
22	:	78
17	:	83

Aus den Alpen konnten nur drei Steinringe ausgemessen werden. Diese Einzel-exemplare lassen es selbstverständlich nicht zu, zwischen einem "alpinen Typ" und einem "hochpolaren Typ" weitreichende Vergleiche anzustellen. Auch die Verhältnisse aus Spitzbergen zeigen grosse Verschiedenheiten, besonders wenn man die Extremwerte betrachtet. Trotzdem kann man feststellen, dass bei den beobachteten polaren Steinringen im Mittel die Feinerderadien und Rahmenbreiten annähernd gleich gross sind. Bemerkenswert ist allerdings, dass bei Steinringen die Rahmenbreite auch wesentlich grösser ausfallen kann als der Feinerderadius. Die in diesem Sinn extremste ausgemessene Form von Spitzbergen wies ein Verhältnis Feinerderadius zu Steinrahmenbreite von etwa 1 : 2 auf. An zwei Beispielen der Alpen zeigten sich noch aussergewöhnlichere Zahlen: die Steinrahmenbreiten nahmen etwa $\frac{4}{5}$ des Gesamtformradius ein.

Um gleichartige Strukturbodenformen in der Grösse von Steinringen und Steinpolygonen *) aus verschiedenen Klimabereichen einander gegenüberstellen zu können, wird man von der Nahbereichsphotogrammetrie abgehen müssen. Mit geeigneten Hochleistungsobjektiven und bei entsprechenden Flughöhen vermögen gross-massstäbliche Stereoluftbilder auch ausgedehnte Strukturbodenfelder gesamthaft zu erfassen. Der Bildmassstab ist so zu wählen, dass die Einzelformen klar zu erkennen und noch ausmessbar sind. Erst eine Vielzahl so untersuchter Formen kann unter Berücksichtigung auch der Verbandsverhältnisse die für ein Gebiet typischen Vertreter einer Strukturform erkennen lassen. Allerdings schränken die hohen Befliegungskosten die Anwendung der Luftbildmessung stark ein.

*) Im Gebiet um Longyearbyen (Westspitzbergen) konnte ich Steinpolygonnetze beobachten, die sich aus mehreren Meter grossen Formen zusammensetzten. Leider reichte die Maximalhöhe des Statives selbst bei geneigter Kamera nicht aus, um solche Riesenformen auf einem Aufnahmenpaar abzubilden. Ein Helikopter stand auf Spitzbergen nicht zur Verfügung.

Beim Ausmessen von Polygonen tritt ein weiteres Problem auf. An sehr eng vergesellschafteten Formen ist die Abgrenzung zwischen zwei - an Eckpunkten sogar drei - aufeinanderstossenden Steinrahmen oft nicht mehr möglich.

1.6.2. Die Oberflächenkrümmungen der ausgemessenen Steinringe

SCHENK (1955, S. 13 ff.) unterscheidet bei rezenten Steinringen, die er auf Spitzbergen beobachtet hat, zwischen der arktischen Winterform eines Steinringes und seiner sommerlichen Auftauform: "Die arktische Winterform zeigt stets eine Aufwölbung. Die sehr umfangreiche Literatur berichtet nirgends von im Winter absolut flachen oder gar eingedellten, nach unten gewölbten Feinerdeflecken. Der Feinerdehügel überragt mehr oder weniger den Steinkranz oder die flache, steinige Umgebung. Die Wölbung ist sehr verschieden und wechselt zwischen schwach und stark. Bei kleinen Formen ist die Krümmung der Oberfläche am stärksten ..." Seiner Ansicht nach erscheint die Sommerform entweder als Hügel - ähnlich der Winterform - oder als Delle. Er meint, es handle sich bei dem in der steinigen Umgebung oder im Innern der Steinringe versenkten Feinerdefeld um die typisch aktive, d.h. lebendige Sommerform des arktischen Klimabereiches. Ueber den Sommer fortbestehende Aufwölbungen der Feinerde deuten auf inaktive Dauerformen hin. Ihre "Rinden" sind ausgetrocknet und steinhart.

Eigene Ergebnisse

Bei allen im Juli 1970 im Gebiet von Longyearbyen (Westspitzbergen) aufgenommenen Steinringen waren die Feinerdeflächen aufgewölbt. Auch die in den Sommern 1969 und 1971 photographierten Steinringe der Schweizer Alpen wiesen eine deutliche Hochwölbung der zentralen Feinerdebeete auf.

Die quadratischen Glieder der "normierten Zentrumparabeln" geben Auskunft über das Mass der Krümmungen. Je grösser die Absolutbeträge der Koeffizienten, desto stärker sind die Kurven gekrümmt. Das negative Vorzeichen - dem mathematischen Ansatz entsprechend - bedeutet eine Aufwölbung. Wie aus der folgenden Zusammenstellung ersichtlich ist, schwanken diese Koeffizienten in einem grossen Bereich.

Koeffizienten der quadratischen Glieder der normierten Zentrumparabeln

Tabelle 2:

<u>Spitzbergen</u>		<u>Alpen</u>	
- 1.1311	} . 10^{-1}	- 1.7758	} . 10^{-1}
- 0.7248		- 0.6317	
- 0.2862		- 0.2050	
- 0.2637			
- 0.1827			
- 0.1652			
- 0.1638			
- 0.0959			
- 0.0288			

Vergleiche dazu auch Fig. 6

Zwischen den Koeffizienten der Kurven über praktisch ebener Feinerde und den Werten für stark gekrümmte Flächen lässt sich nirgends eine deutliche Zäsur feststellen. Es ist aufgrund dieser Zahlen nicht möglich, die von SCHENK erklärte Unterteilung in aktive und inaktive Sommerformen der Steinringe vorzunehmen. Man kann höchstens vermuten, dass aus Spitzbergen die drei fast planen Feinerdeflächen zu den aktiven Formen zu rechnen sind, während die zwei am stärksten gewölbten zu den Ruheformen gehören. Letztere wiesen ausgetrocknete und hart verbackene Oberflächen auf; zwei der flachen Feinerdefelder waren noch ausgesprochen feucht und weich, das dritte dagegen trocken und sehr kompakt. Ich glaube nicht, dass man allein aus der sommerlichen Oberflächenkrümmung und dem Austrocknungsgrad entscheiden kann, ob es sich um einen Steinring der aktiven oder inaktiven Sorte handelt.

Um das dynamische Verhalten einer Form im Wechsel der Gefrier- und Auftauphasen zu erfassen, wird es zweckmässig sein, eine Reihe von Aufnahmen während ganzer Regelationszyklen zu machen. Aus Vergleichen der Wölbungsextrema von Winter und Sommer kann man unter Umständen einen Krümmungswert der sommerlichen Feinerde ermitteln, welcher die Unterscheidung zwischen aktiven und Ruheformen ermöglicht. Solche Untersuchungen dürfen sich jedoch nicht auf formale Aenderungen beschränken; es muss besonders auch dem Wassergehalt und den Temperaturen in verschiedenen Bodentiefen nachgegangen werden.

1.6.3. Die relativen Höhenverhältnisse an den untersuchten Steinringen

In Absatz 1.6.1. dieses Kapitels ist ausgeführt, wie die Relationen Feinerderadius zu Steinrahmenbreite unter den einzelnen Steinringen stark streuen. Dennoch liess sich wenigstens für die Formen aus Spitzbergen ein mittleres Verhältnis zwischen den zwei Massen von etwa 1 : 1 feststellen.

Bei den Vergleichen der Höhenverhältnisse ergaben sich grössere Unterschiede zwischen den einzelnen Steinringen. Bezüglich des Höhen-Nullpunktes beim Uebergang von der Feinerde zum angrenzenden Steinrahmen wurden die Vertikaldifferenzen zu folgenden drei Punkten bestimmt:

- a) Formzentrum = höchster Punkt der Feinerdefläche
- b) Höchster Punkt des Steinrahmens
- c) Peripherer Punkt des Steinrahmens

Die Höhenwerte in diesen Punkten stammen wie die Horizontalmasse in Abschnitt 6.1. aus den normierten Parabeln der Steinringe.

Ergebnisse

a) Schweizer Alpen:

Wie bei den Relationen der Feinerderadien zu den Rahmenbreiten erlauben die nur drei aufgenommenen Steinringe der Schweizer Alpen keine aussagekräftigen Zahlenvergleiche bezüglich der Höhen der oben aufgezählten Punkte.

Trotzdem seien die auch an arktischen Formen ermittelten Vergleiche aufgeführt:

- Bei einer Form liegt das Feinerdezentrum höher als der Steinrahmen
- Der Uebergangspunkt von der Feinerde zum Steinrahmen liegt bei allen drei Formen höher als der äusserste Punkt des Rahmens.

b) Spitzbergen

- Bei 8 der 10 ausgemessenen Steinringe liegen die Formzentren höher als die Rahmenmaxima, d.h. die Feinerdeflächen überragen die Steinrahmen.
- . Bei ebenfalls 8 von 10 Steinringen liegt der innere Rand der Steinrahmen,

also der Uebergang von der zentralen Feinerde zum Rahmen, höher als der periphere Rahmenpunkt.

- 7 der oben genannten 8 Formen weisen beide Merkmale auf.

1.7. Zusammenfassung der in den Absätzen 1.6.1. bis 1.6.3. erzielten ----- Ergebnisse

Für die aus Spitzbergen aufgenommenen 10 Steinringe kann man folgende Aussagen machen:

- 1) Das mittlere Verhältnis zwischen Feinerderadius und Rahmenbreite beträgt bei Steinringen etwa 1 : 1.
- 2) Die Feinerdeflächen sind mehr oder weniger stark konvex gewölbt. Eine klare Abgrenzung zwischen aktiven und inaktiven Formen nach dem Grad der Oberflächenwölbung der Feinerde im Sommer (im Sinn von SCHENK, 1955, S. 13 ff.) ist nicht möglich.
- 3) Die höchsten Punkte der Feinerdeflächen - die Feinerdezentren - überragen in der Mehrzahl der Fälle die Höhe der sie umgebenden Steinrahmen.
- 4) Die Uebergänge von den Feinerdeflächen zu den Steinrahmen liegen im allgemeinen höher als die peripheren Rahmenpunkte.

Die kleinere Zahl der in den Alpen aufgenommenen Steinringe und die grosse formale Verschiedenheit lassen noch keine gesicherten Vergleiche mit den arktischen Formen zu.

2. Kleinformen

Als "Kleinformen" bezeichne ich unter den frostbedingten Bodenmustern solche, deren Durchmesser bei runden Formen oder deren seitlicher Abstand bei Streifen nicht grösser als 20 cm ist. FREUND (1972) hat in vergleichenden Betrachtungen die Kleinformen der Arktis, der Alpen und der Tropen einander gegenübergestellt und in verschiedene Formtypen gegliedert. Ich stütze mich im wesentlichen auf seine Einteilung (FREUND, 1972, S. 64 f.).

Wie bei den im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Steinringen versuchte ich, den typischen Oberflächenverlauf bei Kleinformen mit Profillinien zu erfassen und formale Vergleiche zwischen den Vorkommen auf Spitzbergen, in den Schweizer Alpen und am Kilimanjaro anzustellen. Nach den Beschreibungen aus der Literatur und eigenen Feldbeobachtungen wurden auch hier die "Standardtypen" näher untersucht, d.h. die formalen Leitbilder, die sich für diese Formen als typisch und einheitlich herauskristallisiert haben.

Die photogrammetrischen Aufnahmen der Kleinformen

Die Stereokamera konnte für die Aufnahme der Kleinformen in den gleichen Aufstellungen verwendet werden wie bei den metergrossen Steinringen (vgl. Teil B, Absatz 1.2.1.); die Aufnahmerichtung war dabei lotrecht. Kürzere Aufnahmedistanzen bis hinunter zu einem Meter steigerten die Auswertegenauigkeit im Autographen und passte sie den Dimensionen der Kleinformen an (vgl. Teil B, Absatz 1.2.7.).

2.1. Erdknospen

In der oben zitierten Arbeit bemerkt FREUND zu dieser Art der Kleinformen; "Die Erdknospen bauen sich auf - wie der treffliche Name umschreibt - aus kleinen, höckerartig aufgewölbten Feinerdebuckeln, die umgeben sind von zunächst feinem, dann auch gröberem Schuttmaterial. Der Schutt liegt stets in flachen Mulden, an deren Grund sich in keinem Fall ein Riss in der Feinerde hat feststellen lassen. Der sehr feine, die Feinerde säumende Kiesmantel wird als Rahmenauskleidung bezeichnet... Die Vorkommen von Erdknospen beschränken sich auf horizontale und bis 4° geneigte Flächen."

Ich ziehe den Begriff "Erdknospen" im Sinne von FREUND den von FURRER (1955, S. 200 und 1965, S. 30) synonym verwendeten "Miniatursteinringen" vor, da es nicht immer möglich ist, an den die Feinerde umgebenden "Steinrahmen" den äusseren Rand eindeutig zu erkennen und abzugrenzen (Photo 8).

Das Registrieren der Profile

Bei Erdknospen auf praktisch horizontalem Boden dominieren die Rundformen, d.h. die Grundrisslinien zwischen der aufgewölbten Feinerde und dem sie umgebenden Feinkiesmantel beschreiben annähernd einen Kreis. Der höchste Punkt der Feinerde fällt - wie übrigens bei den Grossformen der Steinringe - im allgemeinen mit der Formmitte zusammen. Es kann aber auch vorkommen, dass innerhalb einer gesamthaft horizontalen Fläche Erdknospen deformiert sind, also z.B. eine längliche oder an den Enden auch spitz auslaufende Form annehmen können. Nach Feldbeobachtungen, die durch photogrammetrische Profilmessungen entlang ganzer Erdknospenfelder gestützt sind, findet man bei asymmetrischer Ausbildung der Feinerdewölbungen stets gewisse lokale Verbiegungen vor. Diese Unregelmässigkeiten sind jedoch so klein, dass sie im Gesamtverband der Formen kaum auffallen.

Aufgrund der vorherrschenden Kreisförmigkeit der Erdknospenumrisse konnten die Profillinien - wie bei den Steinringen - radial vom Formzentrum aus angelegt werden. Die Bestimmung des Ausgangspunktes der Profile geschah in der auf den Seiten 18 f. beschriebenen Art anhand der kartierten Umrisslinien der Einzelformen. Wegen der kleinen Dimensionen der Formen genügten zwischen benachbarten Profillinien Zentriwinkel von 45° - im Gegensatz zu den Grossformen, wo 15° die Regel waren (vgl. Teil B, Kap. 3). Zu knappe Abstände zwischen den Profilen mit mehr registrierten Punkten hätten keinen lohnenden Zuwachs an Genauigkeit für die schliesslich gemittelte Kurve des Oberflächenverlaufs einer Form erbracht.

Die im 1. Abschnitt dieses Kapitels angeführten Gründe verunmöglichten es, bei allen Erdknospen die sie umrahmenden Feinkieswälle an der Aussenseite eindeutig abzugrenzen und dann durch Profile auszumessen.

Die Glättung der registrierten Profile

An Profillinien, die sowohl über der Feinerde als auch über den Steinrahmen registriert werden konnten, erfolgte die Glättung für beide Teilstücke gesondert (vgl. Teil C, Abschnitt 1.4.). In jenen Fällen, wo kein Steinrahmen zu beobachten war, beschränkte sich die Glättung allein auf die Punktefolgen entlang der Feinerdeoberfläche.

Regressionsparabeln an die Teilkurven

Durch die geglätteten Punktefolgen der oben beschriebenen Teilstücke wurden die bestapproximierenden quadratischen Parabeln nach dem gleichen Verfahren berechnet, das in Teil B, Kap. 3. und Teil C, Abschnitt 1.5. beschrieben ist. Die arithmetischen Mittel aus den Parabelkoeffizienten ergaben für jede Einzelform die normierten Zentrumsparabeln, bzw. die normierten Rahmenparabeln.

2.1.1. Ergebnisse

2.1.1.1. Die Dimensionen der ausgemessenen Erdknospen

FREUND (1972, S. 23) stellt die Grössenverhältnisse der von ihm untersuchten Erdknospen aus West-Spitzbergen, Mittelbünden (Schweizer Alpen) und vom Kilimanjaro nebeneinander und gelangt zum Ergebnis: "Obwohl mit allen formtypischen Merkmalen ausgestattet, präsentiert sich die tropische Form viel kleiner als die Formen der beiden anderen Gebiete, die sich grössenmässig weitgehend entsprechen. Auch die von FURRER (1959, S. 284) angegebenen "Miniatursteinringe" entsprechen den von FREUND gemessenen Dimensionen.

Wie ich weiter vorne ausgeführt habe, geben die Steinrahmenmitten - die FREUND und FURRER für die Bestimmung der Feinerdedurchmesser verwenden - keine gesicherten und für vergleichende Messungen geeigneten Bezugspunkte ab. Wie bei Grossformen liegt eine Differenz vor zwischen der scheinbaren Rahmenmitte - die im Feld intuitiv an der Stelle des Höhenmaximums angenommen wird - und der wirklichen Mitte des Steinrahmens; das haben die photogrammetrischen Auswertungen und die normierten Rahmenparabeln ergeben.

An Erdknospen ist das Festlegen einer "Steinrahmenmitte" meines Erachtens aus einem anderen Grund schwierig. Nicht immer umschliessen deutlich als Wulst erkenntliche und damit auch an der Aussenseite abgrenzbare Steinrahmen die zentralen Feinerdehügel.

Wahl und Bestimmung der Bezugspunkte

Die Wahl der Bezugspunkte für die Dimensionsmessungen erfolgte für Erdknospen mit deutlich abgrenzbaren Schuttrumrahmungen nach den gleichen Kriterien wie bei Steinringen (vgl. Teil C, Absatz 1.6.1.). Es sind dies das Formzentrum, als Ausgangspunkt für Horizontalmasse, die gemittelte Grenze zwischen zentraler Feinerdefläche und umgebendem Schuttrahmen als Höhennullpunkt, ferner der höchste Punkt des Schuttrahmens und der periphere Punkt des Schuttrahmens. Die Bestimmung dieser vier Punkte ist in Teil C, Absatz 1.6.1. beschrieben.

Bei Erdknospen in einem Steinpflaster, das keine Schuttrahmenwülste um die Feinerde erkennen liess, wurden als Bezugspunkte das Formzentrum und der periphere Feinerdepunkt an der Grenze zum Steinpflaster verwendet. Die Höhe dieses Ueberganges von der Feinerde zum umgebenden Material berechnete sich durch Einsetzen des durchschnittlichen Feinerderadius in die normierte Zentrumsparabel. Bezüglich der Genauigkeit gilt das gleiche, was über die Bestimmung des peripheren Steinrahmenpunktes auf S. 28 angeführt ist.

2.1.1.2. Das Verhältnis Feinerderadius zur Breite des Feinkieswalles

Die Schwierigkeit, um jede Erdknospe einen Feinkieswall deutlich abzugrenzen, zeigte sich besonders bei den tropischen Formen vom Kilimanjaro, zum Teil aber auch bei den Vertretern aus Spitzbergen. Das Festlegen der Bezugspunkte für die Dimensionsvergleiche - analog den Grossformen der Steinringe - gelang bei etwas mehr als der Hälfte der ausgemessenen Formen.

Prozentuale Verhältnisse zwischen Feinerderadien und Breite der Feinkieswälle

Tabelle 3:

<u>Spitzbergen</u>	<u>Alpen</u>
70 : 30	49 : 51
67 : 33	46 : 54
63 : 37	41 : 59
54 : 46	34 : 66
52 : 48	
50 : 50	
45 : 55	
44 : 56	
43 : 57	
41 : 59	

Die Verhältniszahlen schwanken bei den aus Spitzbergen beobachteten Erdknospen in ähnlichem Mass wie bei den grossförmigen Steinringen des selben Gebietes (vgl. Teil C, Absatz 1.6.1.). Aus den Alpen konnte nur bei vier Erdknospen deutlich zwischen zentraler Feinerde und aufgewulstetem Schuttrahmen unterschieden werden.

Trotz weit auseinanderliegender Extremwerte der Verhältniszahlen bei arktischen Formen kann man feststellen, dass im Mittel die Feinerderadien und die Breiten der Feinkieswälle etwa gleich gross sind.

Die Erdknospen der Alpen dagegen scheinen von vergleichsweise breiteren Schuttwällen eingefasst zu sein; das mittlere Verhältnis zwischen Feinerderadius und Schuttrahmenbreite liegt etwa bei 2 : 3.

2.1.1.3. Die relativen Höhenverhältnisse an Erdknospen mit abgrenzbaren Schuttrahmen

Ausgehend vom Höhennullpunkt am Uebergang von der Feinerde zum angrenzenden Feinkieswall wurden die Höhendifferenzen zu den drei übrigen Bezugspunkten (Teil C, Absatz 2.1.1.1.) bestimmt. In Fig. 7 sind die Radialprofile der ausgemessenen Erdknospen dargestellt.

An allen beobachteten Erdknospen aus den Schweizer Alpen und aus Spitzbergen überragen die Feinerdezentren die höchsten Punkte der umrahmenden Feinkieswälle, und die peripheren Punkte der Feinkieswälle liegen ebenfalls bei allen beobachteten Formen aus den beiden erwähnten Untersuchungsgebieten tiefer als die Uebergänge von der zentralen Feinerde zum Schuttrahmen

2.1.1.4. Die Feinerderadien und die Aufwölbung der Feinerdefläche

In den vorausgegangenen Abschnitten wurden ausschliesslich Erdknospen mit wulstförmigen Feinkiesumrahmungen betrachtet. Hier soll nun an sämtlichen ausgemessenen Formen - also auch an jenen vom Kilimanjaro - untersucht werden, ob zwischen horizontaler Ausdehnung und Aufwölbung der Feinerde eine Gesetzmässigkeit besteht.

Da es sich bei den Erdknospen aller drei Untersuchungsgebiete um genetisch gleiche Formen handelt (FREUND, 1972), dürfen die erwähnten Vergleiche sowohl gesamthaft als auch nach Klimabereichen gesondert angestellt werden. Die in Spitzbergen und in den Schweizer Alpen untersuchten Erdknospen befanden sich in den Sommern zur Zeit der Aufnahmen in einem Ruhezustand, da sie bereits während einigen Wochen keinen Frosteinwirkungen mehr ausgesetzt waren. Die Formen auf dem Sattelplateau des Kilimanjaro hingegen waren der allnächtlichen, wenige Zentimeter in den Boden eindringenden Gefrornis unterworfen. Um trotzdem Vergleiche mit den erstgenannten Erdknospen anstellen zu können, wurden diese Formen erst um die Mittagszeit photographiert, das heisst, nach dem Abschmelzen des Eises, wenn sie sich in einem "stabilen" Ruhezustand befanden.

In Fig. 8 sind für alle ausgewerteten Erdknospen die Feinerderadien und die quadratischen Glieder der normierten Zentrumsparabeln als Mass für die Krümmung der Feinerdeoberfläche dargestellt. Daraus geht hervor, dass zwischen der

horizontalen Ausdehnung der Erdknospen und der Aufwölbung der Feinerdefläche kein Zusammenhang besteht, aus dem sich eine Gesetzmässigkeit ableiten liesse. Die quadratischen Glieder der normierten Zentrumsparabeln weisen für Erdknospen mit annähernd gleichen Halbmessern aus den verschiedenen Klimabereichen eine grosse Streuung auf; auch an gleich grossen Feinerdeflächen der selben Untersuchungsgebiete variieren die Höhendifferenzen von den peripheren Feinerdepunkten zu den Formzentren zum Teil erheblich.

Wenn man Aufwölbungen und Radien der Erdknospen nach Klimabereichen gesondert betrachtet, so lässt sich aufgrund der vorhandenen Ausmessungen - unter dem Vorbehalt der relativ kleinen Anzahl von Beobachtungen - folgendes feststellen :

- Die Erdknospen vom Kilimanjaro präsentieren sich im Durchschnitt viel kleiner als die Formen der beiden anderen Gebiete, zeichnen sich jedoch durch vergleichsweise stärkere Oberflächenaufwölbung aus.
- Die Erdknospen der Alpen und aus Spitzbergen entsprechen sich weitgehend in Bezug auf die horizontale Ausdehnung; für gleiche Feinerderadien zeigt sich bei den alpinen Vertretern allerdings eine kräftigere Aufbeulung der Feinerde.

2.2. Erdstreifen

Unter den Kleinformen der gemusterten Böden nehmen die Erstreifen - zumindest nach den beobachteten Vorkommen aus den Schweizer Alpen und vom Kilimanjaro - mengen- und flächenmässig eine dominierende Stellung ein. Das bei meinen Feldaufnahmen in West-Spitzbergen zugängliche Gebiet erbrachte nur spärliche Funde. Dass allerdings auch in arktischen Breiten diese Kleinformen in bedeutender Menge sogar arengrosse zusammenhängende Flächen überziehen können, zeigen die Beobachtungen FURRERS (1959) aus dem Osten Spitzbergens.

FURRER (1954, S. 241) erkennt Erdstreifen auf geneigten Flächen als homologe Bildungen zu den auf praktisch horizontaler Unterlage auftretenden Erdknospen. Nach übereinstimmenden Angaben aus der Literatur (FREUND, 1972) sind Hangneigungswinkel von mehr als etwa 5° für die Ausbildung zusammenhängender Erdstreifen erforderlich. MOHAUPT (1932, zit. bei FREUND, 1972, S. 25 f.) beschreibt bei

Erdstreifen aus dem alpinen Raum die beulenartige Aufwölbung der Feinerde und deren sehr konstante Breite. An gleichmässig geneigten Hängen zeichnen sich die Erdstreifen (Feinerde) und die sie seitlich begrenzenden Steinstreifen (im folgenden auch Schutt- oder Zwischenstreifen genannt) durch strenge Parallelität aus; sie verlaufen in Falllinienrichtung. Wenn Hindernisse in Form von grösseren Steinen oder Vegetationsinseln vorhanden sind, werden sie "stromlinienförmig" umfahren. Die aufgewölbten Feinerdestreifen scharen sich im Bereich von Engnissen zusammen, ändern jedoch ihre Breite nur unwesentlich, während die Schuttstreifen eingeschnürt werden.

Bei den im folgenden beschriebenen Untersuchungen galt es abzuklären, wie gut sich die Erdstreifen nach der Falllinie orientieren und wie in den drei klimatisch verschiedenen Untersuchungsgebieten die Verhältnisse zwischen den aufgebeulten Streifen der Feinerde und den Schuttstreifen liegen. Die Auswahl der "Standardtypen" richtete sich im wesentlichen nach den oben beschriebenen Merkmalen.

Die photogrammetrischen Aufnahmen

Im allgemeinen waren die aufzunehmenden Flächen nur schwach geneigt, so dass die Stereokamera in den gleichen Aufstellungen mit lotrechter Aufnahme - richtung wie bei den Erdknospen verwendet werden konnte (vgl. Teil C, Kap. 2).

Das Registrieren der Profile

Bei den Erdstreifen - wie übrigens schon bei allen Frostmusterformen in den vorausgegangenen Kapiteln - wurden nur Formen ausgemessen, die in ihrem äusseren Erscheinungsbild dem "Standardtyp" möglichst nahe kamen, d.h. die aufgewölbten Feinerdestreifen mussten optisch deutlich von den zwischen- gelagerten Schuttstreifen abgetrennt werden können. Zwecks Ueberprüfung der Fallinientreue der Erdstreifen wurden - vorgängig der Profilregistrierung - mit dem Stereoautographen an mehreren Stellen Höhenkurven mit 1 cm Aequi- distanz über die Felder aufgezeichnet. Daraufhin kartierte ich den Verlauf der Erdstreifen, wobei die Messmarke den Mitten der Streifen nachgeführt

wurde (siehe Fig. 9). In der im Massstab 1 : 10 vorliegenden Grundrisszeichnung wurden die "oszillierenden" Isohypsen graphisch im Sinne einer Glättung generalisiert. Dabei zeigte sich, dass der Verlauf der Erdstreifen mit der Falllinienrichtung in der Regel identisch ist. Aus diesem Grunde legte ich die Profillinien für die folgende punktweise Koordinatenregistrierung jeweils entlang einer graphisch ausgeglichenen Höhenkurve.

Die Profile sind die Verschneidungslinien zwischen der von Erdstreifen gemusterten Fläche und einer Lotebene des Auswertekoordinatensystems. Ihre Lage ist gegeben durch die vertikale z-Achse und die aufgrund der Kartierung (Fig. 9) festgelegte Profillinienrichtung in der x-y-Ebene. Entlang dieser Verschneidungslinien wurden in sehr kleinen horizontalen Abständen (0.5 bis etwa 3 mm in der Natur) an allen Unstetigkeitsstellen Punkte registriert (vgl. Teil B, Kap. 3). Ausserdem wurden auch an gleichmässigen Krümmungen des Oberflächenverlaufs dicht aufeinanderfolgend Punkte eingemessen. Als Unterscheidungsmerkmal zwischen Erd- und den sie säumenden "Steinstreifen" dienten verschiedene Punktidentifikationsnummern, die man gleichzeitig mit den drei Koordinatenwerten registriert.

Die Hangneigung

Die Grösse des Hangneigungswinkels (α) konnte bei der photogrammetrischen Auswertung einfach bestimmt werden - nämlich aus dem Horizontalabstand (d) zweier Punkte in Falllinienrichtung (in der Regel etwa 30 cm) und ihrer Höhendifferenz Δh nach $\tan \alpha = \frac{\Delta h}{d}$.

Um zufällige Unregelmässigkeiten auszuschalten, die nichts mit der formtypischen Ausprägung der Erdstreifen zu tun haben, wurde aus jeweils sechs Messungen in unmittelbarer Umgebung der Profillinie der durchschnittliche Hangneigungswinkel gemittelt. Genauigkeitsprüfungen haben gezeigt, dass sich auch mit mehr Messungen der mittlere Fehler an der so bestimmten Hangneigung nur noch unwesentlich verringert; er liegt in allen Fällen unter $\pm 0.3^\circ$.

Die Glättung der Profillinien

Ohne Berücksichtigung des Hangneigungswinkels sind alle Profile in Vertikalebene des Auswertekoordinatensystems mit horizontaler x-y-Ebene registriert worden; diese Vertikalebene standen dabei im allgemeinen nicht parallel zum x-z- oder y-z-Achsenkreuz, sondern auf der gezogenen Profillinie.

Vor der Glättung war es erforderlich, die in den drei Raumkoordinaten registrierten Punkte in eine einfachere Form zu bringen, die sich für die Weiterverarbeitung besser eignet. Zunächst berechnete ich aus den Lagekoordinaten x_i und y_i die Abstände vom Koordinatenursprung: $d_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$. Diese Strecken wurden - wie bei grossen Steinringen die Punktabstände vom Formzentrum (siehe Teil B, Kap. 3) - in der Folge neu mit X_i bezeichnet. Auf diese Art erfolgte gleichsam eine Drehung des Koordinatensystems um die z-Achse; die neue X-Achse fällt nun mit der Profilschnittebene zusammen.

Schliesslich wurden die Profillinienebenen um eine Parallele zur X-Achse in der x-y-Ebene - um den Betrag des Hangneigungswinkels (α) gedreht. Aus den Registrierwerten z_i' berechneten sich, senkrecht zur Bodenfläche, die neuen wirklichen Höhen $z_i = z_i' \cdot \cos \alpha$.

Die Glättung der registrierten Profilpunkte geschah nach den gleichen Formeln wie bei allen früher beschriebenen Frostmusterformen (vgl. Teil A, Kap. 5). Die Glättungsabschnitte wurden durch Teilprofilstücke über den aufgebeulten Feinerdestreifen und den zwischengelagerten Schuttstreifen bestimmt. Anhand der Material- und Strukturverschiedenheit und oft auch wegen der Farbunterschiede zwischen diesen "Streifen" konnten die Grenzpunkte eindeutig festgelegt werden.

Die Approximierung der geglätteten Profillinien durch Parabeln

Nach der Methode der kleinsten Quadrate - die bereits bei den Grossformen der Steinringe beschrieben ist (siehe Teil B, Kap. 3) - wurden diejenigen quadratischen Parabeln berechnet, welche sich den vorgegebenen Kurven am besten anschmiegen.

2.2.1. Ergebnisse

2.2.1.1. Die Verhältnisse Erdstreifen- zu Schuttstreifenbreite

Die Streifenbreiten sind als Horizontalabstände in der Profillinienenebene gemessen. Als Bezugspunkte eigneten sich die eindeutig feststellbaren Grenzen zwischen den Feinerde- und den Schuttstreifen. Wie schon bei den ausgemessenen Erdknospen zeigte es sich auch hier, dass die Erdstreifen aus dem tropischen Hochgebirge (Kilimanjaro) nur etwa halb so breit ausfallen wie die gleichen Formen der Schweizer Alpen und West-Spitzbergens. In der folgenden Tabelle sind die Streifenbreiten nach Fundorten getrennt zusammengestellt.

Tabelle 4:

<u>Kilimanjaro</u>		<u>Schweizer Alpen</u>		<u>Spitzbergen</u>	
Erdstreifen (mm)	Schuttstreifen (mm)	Erdstreifen (mm) (Parpaner Rothorn)	Schuttstreifen (mm)	Erdstreifen (mm)	Schutt- streifen (mm)
14	9	35	43	37	38
14	16	35	60	39	40
15	21	40	75	43	47
17	26	49	79	54	57
22	27	62	87	—	—
22	34	69	98	43	45
24	35	71	116	Mittelwerte	
38	36	71	125		
31	41	—	—		
36	51	54	85		
37	52	Mittelwerte			
—	—				
25	31	(Munt Chavagl)			
Mittelwerte		61	44		
		70	61		
		74	64		
		—	—		
		68	42		
		Mittelwerte			

Bei den ausgemessenen Erdstreifenfeldern vom Sattelplateau des Kilimanjaro betrug die durchschnittliche Breite der aufgewölbten Feinerde 2.5 cm, diejenige der Zwischenstreifen 3.1 cm; sie sind also deutlich die schmalsten aller beobachteten Vertreter.

Die aus den Schweizer Alpen untersuchten Formen differierten nicht nur in der Streifenbreite gegenüber den oben aufgeführten, sondern auch im Verhältnis Erd- zu Streifenbreite. Die Erdstreifen vom Totälpli (Parpaner Rothorn) erreichten im Mittel 5.3 cm Breite; sie wurden von den 8.5 cm breiten Zwischenstreifen deutlich übertroffen. Am Munt Chavagl hingegen domierten die Feinerdewülste (6.8 cm) gegenüber den dazwischenliegenden Feinkiesfüllungen (4.2 cm). Zu diesem Strukturbodenfeld ist allerdings zu bemerken, dass die "Standardform" der Erdstreifen nur an drei Stellen gefunden und ausgemessen werden konnte *).

Die Vertreter West-Spitzbergens wiesen gegenüber den alpinen Formen nur unwesentlich kleinere Breiten auf; man kann das Verhältnis der Feinerdestreifen zu den Zwischenstreifen mit 4.3 cm zu 4.5 cm als ausgeglichen bezeichnen. Hier jedoch fiel es noch schwerer als in den Alpen "Idealformen" zu finden *); der unregelmässige Verlauf der Erdstreifen ist schon bei den Feldbeobachtungen deutlich sichtbar.

*) Bei der Betrachtung eines Erdstreifenfeldes in der Natur oder auf Photographien glaubt man im allgemeinen, einen sehr regelmässigen Verlauf in Längsrichtung mit gleichmässig aufgebeulter Feinerde und eine ziemlich konstante Breite der Streifen festzustellen. Erst die ausschnittsweise - stereoskopische - Vergrösserung im Autographen deckt viel mehr Unregelmässigkeiten auf, als man bei Beobachtungen mit freiem Auge - dabei intuitiv generalisierend - erkennt. Ich verweise dazu auf Photo 9 und die Höhenkurvendarstellung der gleichen Fläche (Fig. 9).

2.2.1.2. Vergleiche zwischen Querprofilen durch Erdstreifen und zwischen- gelagerte Steinstreifen

In den Figuren 10 und 11 sind die quadratischen Glieder der "normierten Parabeln" über Feinerde- und Zwischenstreifen als Mass für die Krümmung sowie die Streifenbreiten aufgetragen.

a. Feinerdestreifen

Aus den Mittelwerten der quadratischen Glieder der normierten Feinerdeparabeln für die drei Untersuchungsgebiete und den durchschnittlichen Streifenbreiten geht hervor, dass der Grad der Aufwölbung bei den Feinerdestreifen von deren Breite abhängig ist. Die schmalen Streifen vom Kilimanjaro sind verhältnismässig am stärksten aufgebeult; die mittleren Krümmungen der alpinen und arktischen Formen sind zwar annähernd gleich, doch zeigt sich auch hier eine Verflachung der Erdstreifen mit zunehmender Breite.

b. Steinstreifen

Im Gegensatz zu den stets konvex aufgebeulten Feinerdestreifen ergibt sich für die zwischengelagerten Schuttbänder (Fig. 10) ein anderes Bild. Hier erscheinen an den untersuchten Flächen sowohl eingedellte (konkave) als auch konvexe Streifen nebeneinander. Auffallend ist der Gegensatz zwischen den tropischen einerseits und den Formen Spitzbergens sowie der Schweizer Alpen andererseits. Bei den ersten überwiegen die konkaven Querschnitte, während die Steinbänder aus den beiden anderen Klimabereichen mehrheitlich hochgewölbt sind.

Schliesslich kann man noch feststellen, dass die Durchschnittsbreiten von Steinstreifen und Erdstreifen der tropischen Formen kleiner sind als bei den arktischen und diese kleiner als die alpinen.

2.2.1.3. Bemerkungen zum Verlauf der Erdstreifen

Figur 8 zeigt die Kartierung eines Erdstreifenfeldes vom Sattelplateau des Kilimanjaro, wo ich die am schönsten ausgeprägten Formen aller Untersuchungsgebiete fand. Was GRAF (1971, S. 25) aus den peruanischen Anden und FREUND (1972, S. 33) am Kilimanjaro über den Verlauf der Erdstreifen festgestellt haben, kann die vorliegende Darstellung bekräftigen:

Trotz gleicher Hangneigung innerhalb des Testfeldes bleibt entlang eines einzelnen Erdstreifens die Breite seiner Feinerde ebensowenig konstant wie die Höhe der Aufwölbung (aus diesem Grunde habe ich in Absatz 2.2.1. nur Mittelwerte miteinander verglichen). Bei der Betrachtung des kartierten Erdstreifenfeldes stellt man ausserdem fest, dass die Streifen nicht streng parallel laufen, sondern sich auch verzweigen oder zusammenlaufen können, was besonders gut im überhöhten und vergrösserten Stereobild zu sehen ist.

3. Kammeisbeobachtungen am Kilimanjaro

Nach TROLL (1944, S. 575) entsteht Kammeis durch nächtlichen Ausstrahlungsfrost auf feinkörnigem nacktem oder nur spärlich bewachsenem Boden bei fehlender Schneedecke durch kurze Frosteinwirkung auf die Bodenoberfläche. Aus den Poren des feuchten Unterbodens wird bei der Eisbildung Wasser von den Eisnadeln angesaugt. Ähnliche Formulierungen sind auch bei KRUMME (1935) und SCHENK (1955) zu finden. FURRER (1955, S. 195) bemerkt: "Die Eisnadeln stehen senkrecht auf dem Boden und tragen an ihren Spitzen die obersten Bodenpartikel... Der Abschmelzprozess des Kammeises bringt ebenfalls die gehobenen Partikel nicht mehr in ihre ursprüngliche Lage zurück. Auf Hängen kollern die...Steinchen... oft beträchtliche Strecken talwärts."

Solche Verhältnisse fand ich besonders schön auf dem Sattelplateau des Kilimanjaro (4300 müM) vor. Das veranlasste mich, mit einer Folge photogrammetrischer Aufnahmen Verschiebungsbeträge und Hebungen der obersten Bodenpartikel zu ermitteln.

3.1. Versuchsfeld und Durchführung der Aufnahmen

Das Feld für die Kammeisbeobachtungen lag etwa 100 m von den im vorigen Kapitel (Teil C, 2.1.1.4) beschriebenen Erdknospen entfernt. Die mittlere Hangneigung der 50 x 70 cm messenden ebenen Testfläche betrug 3° , Exposition SE. Das Stativ der Kamera wurde auf anstehendem Fels fest verankert und sicherte so die gleichbleibende äussere Orientierung der Messbilder während der Aufnahmereihe. Kontrollmessungen an drei auf dem Fels angebrachten Marken bestätigten bei der Auswertung die Stabilität der Aufstellung. Um das Wechseln der Photoplatten ohne Betreten des Feldes zu ermöglichen, musste die Stereokamera etwas seitlich postiert und vom Felsen aus zugänglich sein; das bedingte eine Kippung der Aufnahmerichtung um 30° gegen die Vertikale.

Zwecks späterer Identifizierung der einzumessenden Punkte verteilte ich weisse, wenige Millimeter lange Streichholzstücke in Reihen über das Versuchsfeld. Der scharfe Kontrast zum dunklen Feinerdematerial erhöhte die Auswertgenauigkeit (Photo 10).

Die insgesamt 14 Stereopaare umfassende Aufnahmereihe lief von 20.30 Uhr des 27.12.1970 bis 09.30 des folgenden Tages. Nachts wurde mit Blitzlicht exponiert. Die in mehreren Höhen gemessenen Temperaturen sind in Fig. 12 wiedergegeben. Abgesehen von vereinzelt aufgetretenen schwachen Luftbewegungen war das Wetter während des Versuchs windstill und klar.

3.2. Die Ausmessung

Im Stereokartiergerät A-40 mit Transformationsgetriebe wurden die Raumkoordinaten der die Fläche repräsentierenden Punkte (Streichholzstückchen) jedes Modells abgegriffen und registriert. Zur Kontrolle trug ich ihre Lage im Grundriss noch auf dem Zeichentisch auf. So konnte verhindert werden, dass Werte von Nachbarpunkten irrtümlich in die Messreihe eines Punktes rutschten, weil beim Abschmelzen einzelne Holzstückchen unter umstürzenden Eisnadeln begraben worden waren.

Wegen der Aufnahmeneigung von 30° wurden die Raumkoordinaten rechnerisch in das dreidimensionale Orthogonalsystem mit horizontaler x-y-Ebene transformiert (Formeln siehe Fig. 5).

Für den mittleren Fehler der räumlichen Lage der Punkte muss ein etwas höherer Wert als der theoretisch anzunehmende eingesetzt werden. Registriert wurde an den Streichholzstückchen immer der Mittelpunkt, was mit einem kleinen Schätzfehler verbunden war. Zur Feststellung dieses Fehlers registrierte ich bei 20 Stäbchen - mit der Genauigkeit für "signalisierte Punkte" = $0.1 \text{ }^{\circ}/\infty$ (siehe Teil B, Absatz 1.2.7.) der Aufnahmedistanz - die Koordinaten der beiden Endpunkte, berechnete aus ihnen die Mittelwerte (Mitten der Stäbchen) und verglich sie mit den Registrierwerten der direkt geschätzten Mittelpunkte. Daraus resultierte schliesslich ein gesamter mittlerer Fehler an Lage und Höhe von weniger als $\pm 1 \text{ mm}$.

3.3. Ergebnisse

Figur 13 enthält die Auswerteresultate. Der Anschaulichkeit wegen ist nur knapp die Hälfte aller ausgelegten 138 Punkte dargestellt; einzelne konnten - wie oben gesagt - in den letzten Aufnahmen nicht mehr identifiziert werden, weil sie von Feinerdekrümeln umgekippter Eisnadeln zugedeckt waren. Von jedem eingezeichneten Punkt ist die Anfangslage, die Lage während der stärksten Hebung und die Endsituation nach dem Abschmelzprozess festgehalten.

Der Nullpunkt der Höhenskala in Figur 12 liegt auf anstehendem Fels am Rand des Testfeldes. Aus den Durchschnitten aller ausgemessenen Punkte der Fläche ergaben sich folgende kennzeichnenden Werte: Um 22.00 Uhr lag die Oberfläche bei 21 mm der Skala am tiefsten. Am nächsten Morgen 07.00, beim Hebungsmaximum, lag sie 20 mm höher. Das ist kein aussergewöhnlicher Wert, verglichen mit den von KRUMME (1935) beschriebenen dezimeterlangen Nadeln im Hochtaunus.

Interessant ist der Vergleich des Temperaturverlaufs an der Bodenoberfläche mit der Höhenlage des Testfeldes. Auf Schwankungen der Temperatur reagiert letztere mit etwa zweistündiger Verzögerung. Das Absinken unter den Gefrierpunkt ($+ 1.5$ bis $- 0.5^{\circ}$ C) zwischen 20 und 21 Uhr wirkt sich erst zwischen 22 und 23 Uhr im Beginn des Kammeiswachstums aus. Auf den konstanten Abfall bis $- 3.5^{\circ}$ um 04.00 folgt dann in einer Stunde eine rasche Erniedrigung um fast 1° auf den tiefsten Wert dieser Nacht - und wiederum 2 Stunden später erreicht die Hebung der Oberfläche das Maximum bei 41 mm, was der Nettohebung von 20 mm entspricht. OUTCALT (1970, S. 334) stellt in einer Graphik die Bodenoberflächentemperaturen und Hebungsbeträge während einer Beobachtungsperiode von 24 Stunden dar. In diesem Beispiel unterschreitet die Temperatur 0° C bereits 6 Stunden vor der Hebung erstmals, steigt jedoch nach 2 1/2 Stunden für weitere 2 Stunden auf 0° . Beim nachherigen Absinken unter den Gefrierpunkt beginnt die Hebung sofort und dauert 10 Stunden an, gerade solange, wie die Temperatur negativ bleibt.

Hebungs- und Verschiebungsbeträge (siehe Figur 14)

Die Hebungen der Testpunkte wurden in der vertikalen z-Richtung des (Auswerte-) Koordinatensystems bestimmt. Unter der Annahme, dass die Eisnadeln senkrecht zur Bodenfläche wachsen, stellt sich zwischen Hebungsrichtung und z-Achse der Hangneigungswinkel von 3° ein. Streng genommen wäre also eine Division durch den Cosinus der Hangneigung (α) nötig, um die absolute Länge (H) der Nadeln zu bekommen, doch liegt der Funktionswert $\cos 3^{\circ} = 0.9986$ so nahe bei 1, dass Änderungen an den Nadellängen noch weit unter dem mittleren Fehler der Ausmessung blieben. Dasselbe gilt für das Verhältnis der horizontalen Verschiebung zur Verlagerung entlang der Bodenoberfläche.

Uebrigens hat sich gezeigt, dass verschiedene Punkte bei der Hebung durch gekrümmte Nadeln sogar hangaufwärts verschoben wurden. Es darf also nicht ohne weiteres angenommen werden, dass jeder einzelne Punkt bereits während des Wachsens der Nadeln in Richtung der Fallinie bewegt wird. Aus der Gesamtverlagerung der Testpunkte kann dennoch angenommen werden, dass die Hauptrichtung des Nadelwachsens normal zur Abkühlungsfläche verläuft. Es kann auch bei grösseren Hangneigungen vorkommen, dass die Eisnadeln gekrümmt wachsen, wie es FURRER (1955, S. 195) besonders an randständigen Nadeln von Kammeisbüscheln sogar an einer senkrechten Wand beobachtet hat.

Die durchschnittliche Verlagerung, welche die Testpunkte beim Abschmelzen der Eisnadeln hangabwärts erfuhren, betrug 2 mm. Dieser Betrag lässt sich meines Erachtens so erklären: Der grösste Teil der Eisnadeln steht vor Einwirkung der morgendlichen Sonnenbestrahlung und erwärmten Luft leicht hangabwärts gerichtet. Beim Schmelzprozess verlieren die Nadeln - meistens an ihrer Basis zuerst - den Halt und stürzen abbrechend um. In direkter Beobachtung konnte ich sehen, wie die emporgehobenen Erdkrümel und Steinchen dabei scheinbar regellos durcheinander kollerten. Dass die Gefällsrichtung dennoch auch bei der geringen Hangneigung von 3° bevorzugt wird, beweist die Transportstrecke von durchschnittlich 2 mm. KRUMME (1935) (zit. bei FURRER (1955)) ermittelte Bewegungsbeträge von 6 bis 8 cm an Hängen von 20 bis 25° Neigung nach jeder Abschmelzung, bei Hangneigungen von 30 bis 40° zwei- bis dreimal mehr. Leider fehlen dabei Angaben über die Nadellänge. Mit Recht bemängelt FURRER (1955) die bei diesen Untersuchungen verwendeten, zu grossen, 6 cm^2 -Holzplättchen. Diese stören nicht nur die Nadelbildung, sondern verhalten sich auch anders als einzelne, wenn auch lose zusammenhängende Erdpartikel. Es wird interessant

sein, bei späteren Arbeiten die morphologische Wirksamkeit des Kammeises nach Feuchtigkeitsverhältnissen an der Bodenoberfläche, Hangneigung, bewegter Bodenmasse und Länge der Eisnadeln eingehend zu untersuchen.

3.4. Das Problem der gestreiften Auffrierböden

Seit TROLL (1944, S. 583 f.) eine plausibel erscheinende Erklärung der schon von KLUTE (1912, S. 97 f.) bemerkten parallelen Streifung gewisser Feinerdefelder der tropischen Hochgebirge gegeben hat, wurde bei nicht hangabwärts orientierter Richtung der Streifen stets von "windgestreiften Auffrierböden" oder von der "Windstreifung des Kammeises" gesprochen. Beispielsweise KLUTE berichtet von "Sandrillen" aus winzigen Leisten von 3 cm Höhe und 1.5 cm Breite, die über grössere Flächen in Ost-West-Richtung verlaufen. Er machte diese Beobachtung ebenfalls in der Sattelregion des Kilimanjaro. Dazu TROLL; "Diese Streifung hat aber nichts mit den Streifenböden oder der Hangsolifluktion zu tun... Sie stand nicht in Beziehung zur Hangneigung, sondern hatte eine ganz einheitliche Orientierung nach der Himmelsrichtung, nämlich nach den sehr kräftigen und bitter kalten Winden... Die Streifung geht von der Eisbildung aus und hat auch nichts mit direkter Windformung oder Deflation zu tun. Sie soll als "Windstreifung des Kammeises" bzw. als "windgestreifter Auffrierboden" bezeichnet werden zur Unterscheidung von den hangabwärtsorientierten gestreiften Strukturböden. Leider war es nicht möglich, die Bildung dieser Streifen beobachtend zu verfolgen."

KLUTE (1912, S. 98 f.) beschreibt in der von TROLL zitierten Arbeit aber auch einen gestreiften Feinerdeboden im Innern einer westexponierten Höhle am Kilimanjaro, wo die Streifung nur soweit reicht, wie die Fläche besonnt ist !

Nach meinen Beobachtungen rührt die Streifung kaum von nächtlichen Winden her. Kammeisflächen, die ringsum von fast halbmeterhohen steil einfallenden Steinwänden umrahmt sind, lassen es unmöglich erscheinen, dass die Parallelstreifung durch die für die angenommene Bildung sicher erforderlichen laminaren Luftströmungen herbeigeführt wird. Gleiches gilt für das von KLUTE beschriebene Vorkommen in einer Höhle. Auf dem Sattelplateau waren die stets in der selben Richtung laufenden Parallelen in der Tat auffallend. Die Vermutung, dass

differenzierte Sonnenbestrahlung die Ursache sein könnte, liess sich in einem Versuch bestätigen. Auf einem, unmittelbar neben dem vorher beschriebenen Testfeld (3° Neigung, Exposition NW) wurde am Vorabend der Beobachtung die vorher deutlich gestreifte Oberfläche sorgfältig eingeebnet. Längs einer Geraden senkrecht zur ursprünglichen Streifenrichtung, wurden schmale Holzstäbe in absichtlich unregelmässigen Abständen lotrecht so tief in den Boden gesteckt, dass sie durch Kammeiseinwirkung nicht verschoben werden konnten. Ueber Nacht bildeten sich erwartungsgemäss Eisnadeln, wobei die angehobene Bodenoberfläche noch keine besondere Strukturierung erkennen liess. Aufschlussreich waren die Beobachtungen nach Sonnenaufgang. Im Schatten der Holzstäbe blieben die Eisnadeln noch fast eine Stunde stehen, während auf den besonnten Teilen das filigrane Nadelwerk zusammenbrach.

Auf praktisch horizontalen Flächen wird keine Richtung beim Umkippen der Nadeln ausgesprochen bevorzugt, die angehobenen Erdkrümel sinken aber auch nicht notwendigerweise in ihre ursprüngliche Lage zurück (FURRER, 1955). Bei jedem Abschmelzvorgang findet eine Durchmischung der obersten "Bodenschicht" statt. Die Eisnadeln fallen wirr durcheinander. Im Fall der beschatteten - und damit länger stehenden, stabilen - Streifen lagert sich aber Erdmaterial an diesen seitlich ab, da die kippenden Nadeln aufgefangen werden und die ihnen aufsitzenden Erdkrümel hier absetzen. Bei steigender Wärmezufuhr durch Einstrahlung und warme Luft schmilzt endlich auch noch das Eis in diesen Streifen ab. Das ihnen angelagerte Feinmaterial bildet jedoch dabei eine Art stützender Seitenwälle, welche die Kipprichtung der jetzt umstürzenden Eisnadeln bestimmen. Infolge der Einrahmung vermögen diese die emporgehobenen Partikel zum grössten Teil nur noch innerhalb der von den "Dämmen" vorgegebenen Bahnen abzusetzen. Der sich während jedes Gefrier-Abtau-Prozesses wiederholende Vorgang führt den länger beschatteten Streifen ständig mehr Material zu, was schliesslich zur augenfälligen Parallelstreifung führt. Verbindungen zwischen benachbarten Streifenkämmen und Unterbrüche der Streifen sind durch zufällige Kleinstörungen erklärbar: z.B. Unregelmässigkeiten beim Wachsen oder Zusammen-sacken des Kammeises, Verschwemmungen durch Niederschläge, turbulente Luftströmungen besonders während des Schmelzens der Eisnadeln.

Für das Zustandekommen der Sonnenstreifung des Kammeises in der Natur genügen schon kleine schattenwerfende Erhebungen am "Lokalhorizont" gegen die

ersten das Feld treffenden Sonnenstrahlen, beispielsweise eine gezackte Felskante, kleine Steinchen, ja sogar kurze Grasbüschel. Voraussetzung ist aber eine Entfernung der beschattenden Kulisse vom Auffrierboden, in der die Schlag Schatten noch randscharf fallen - die direkte Sonnenstrahlung muss gegenüber der diffusen überwiegen.

Nach diesen Befunden ist es wohl richtig, die Bezeichnung "windgestreifter Auffrierboden" durch "sonnengestreifter Auffrierboden" oder "Sonnenstreifung des Kammeises" zu ersetzen.

D. KAMMEISVERSUCHE IM LABOR

1. Einleitung

Wenn man versucht, eine Naturerscheinung möglichst gesamthaft zu erfassen und zu erklären, so wird man zuerst die auf sie wirkenden Einflüsse abgrenzen und aufteilen und dann danach trachten, diese Einzeleinflüsse zu analysieren. Die Natur selbst liefert aber dazu kaum ideale "Versuchsanlagen", in denen man das dynamische Verhalten einer Erscheinung unter gleichen Bedingungen und Einflüssen mehrmals nacheinander beobachten kann; erst so jedoch lässt sich die Wirkung einzelner Vorgänge und ihr Zusammenspiel ergründen.

Im besonderen Fall der gemusterten Böden treten folgende Erschwernisse auf: die sich wiederholenden Vorgänge spielen sich oftmals nicht gleichzeitig oder wenigstens kurz aufeinanderfolgend ab, auch die gesamte Zykluslänge verunmöglicht meistens ein kontinuierliches Verfolgen von Aenderungen. Ich denke dabei beispielsweise an die grossen arktischen Strukturbodenformen, deren Zustand einem jahreszeitlichen Wechsel unterliegt. Ausserdem vermögen unvorhergesehene Witterungseinflüsse die Feldarbeiten nachhaltig zu stören.

Im Laborversuch dagegen lassen sich viele Einflussgrössen kontrolliert variieren, und die Versuche können beliebig oft wiederholt werden. Vorausgesetzt, dass ein Experiment dadurch nicht verfälscht wird, kann man gewisse, in der Natur sehr langsame Entwicklungen zeitlich raffen und durch Wiederholung intensivieren, ohne dass sie formal anders verlaufen. Alle isolierten Experimente im Labor dürfen selbstverständlich nur auf die klar erkannten und von anderen zu trennenden Einflussgrössen abzielen. Daher wird es wohl kaum möglich sein, allein aus den Resultaten solcher Versuche - und seien sie noch so gewissenhaft durchgeführt - absolute Schlüsse zu ziehen und allgemeine Gesetze aufzustellen. Ziel des Laborversuches muss es sein, mit den gewonnenen Resultaten die Feldarbeit zu befruchten und so zur Klärung der komplexen Bildungsvorgänge und zur Kenntnis der Genese beizutragen.

Bei den in dieser Arbeit beschriebenen Oberflächenformen ist in erster Linie der Frost die treibende Kraft für die Bildung und Formung der Strukturen. Veränderungen, die auch unter natürlichen Bedingungen vergleichsweise rasch

vor sich gehen, eignen sich für Experimente im Labor besonders gut. Die praktisch allnächtlich auftretende Gefrornis zum Beispiel - typisch für die tropischen Hochgebirge - bewirkt unter geeigneten Verhältnissen die Ausbildung von Kleinformen wie Erdknospen und Erdstreifen. Für ihr Zustandekommen spielen das Kammeis, verbunden mit der Mikrosolifluktion eine wichtige Rolle (FREUND, 1972, S. 95). Es lag nahe, das sich innert weniger Stunden vollziehende Kammeiswachstum unter kontrollierten Bedingungen im Labor zu verfolgen und dann zu versuchen, die Ergebnisse mit den Feldmessungen zu vergleichen. Für die Entstehung der Eismadeln und die Hebung der obersten Bodenpartikel sind folgende Hauptfaktoren wichtig: Das Absinken der Lufttemperatur auf wenige Grade unter 0°C und die damit verbundene Abkühlung der Bodenoberfläche unter den Gefrierpunkt, eine krümelig lockere Struktur mit bestimmter Korngrössenzusammensetzung der obersten "Bodenschicht" sowie ein gewisser Feuchtigkeitsgehalt des Bodenmaterials.

Diese drei Bedingungen lassen sich "künstlich" sehr gut in einem Modellversuch herstellen und regeln. Am Geographischen Institut der Universität Zürich steht dazu ein Thermoschrank (Fabrikat BBC) zur Verfügung, der mit einer automatischen Schaltuhr und zwei Thermostaten versehen ist. Er kann für Zeitintervalle bis 24 Stunden auf Temperaturen zwischen $+15$ und -30°C für wiederholte Frostwechsel oder auf konstante Temperaturen während längerer Zeiten eingestellt werden.

In den Versuchen verwendete ich Probenmaterial vom Totälpli (Parpaner Rothorn) aus den Schweizer Alpen, wo FREUND (1972, S. 95) unter natürlichen Verhältnissen die Bildung von Kammeis beobachtet hat.

1.1. Die Versuchsanordnung

Das etwa 8 kg wiegende Probenmaterial wurde vor dem Versuch so stark durchfeuchtet, dass die Krümelstruktur der Oberfläche gerade noch erhalten blieb. Um die Abkühlung möglichst naturgetreu nur von oben auf die Bodenprobe einwirken zu lassen, bettete ich das Material in eine 20 cm hohe Kunststoffwanne, auf deren Wänden und Boden isolierender Hartschaum (Stebathan) etwa 5 cm dick aufgetragen war. Wegen des Ventilators, welcher die Wärmeabfuhr besorgte, wurde eine dünne Plastikfolie über die Wanne gespannt, um die sonst beträchtliche Verdunstung und Austrocknung der Bodenprobe zu verhindern. Dieser Schutz verzögerte allerdings den Temperatúraustausch zwischen der Luft und der Probe; das bedingte längere Abkühlungs- und Erwärmungsphasen, als sie normalerweise in der Natur vorkommen. In Vorversuchen stellte ich fest, dass die Isolierschicht bei Lufttemperaturen von -25°C nach etwa 8 Stunden durchdrungen war und das Erdmaterial auch an den Innenwänden und am Boden zu gefrieren begann. Deswegen musste ich die seitlichen Schaumschichten verstärken und in der Bodenausschäumung eine Wärmezufuhr einrichten; ein zwei Meter langer Plastikschlauch wurde als "Heizschlange" ausgelegt, durch die pro Minute etwa 1 Deziliter 12° warmes Wasser zirkulierte. Diese Einrichtung gewährleistete, dass auch bei sehr tiefen Lufttemperaturen nur die obersten 1 bis 2 cm des Bodens gefrieren.

Mit Hilfe von verstellbaren Rasten lässt sich der Trägerrost der Wanne - und damit die Oberfläche des Probenmaterials - in beliebigen Neigungen im Thermoschrank einhängen.

Es sei hier noch auf einige Eigenarten des verwendeten Gerätes hingewiesen. Nach jeweils 6 Stunden schaltete das Kühlaggregat und der Ventilator eine zehnminütige "Erholungspause" ein. Das macht sich besonders bei Minustemperaturen bemerkbar; neben den unter der elastischen Kunststoffdichtung der Schranktüre herausgeführten Kabeln der Thermofühler fließt Kaltluft ab, so dass sich die Lufttemperatur im Schrankinnern jeweils beträchtlich erhöht, was auf das Probenmaterial unter der schützenden Wannenabdeckung jedoch keinen störenden Einfluss hat.

Bei seinen Experimenten zum Bodenfrost mit dem gleichen Kühlschrank bemerkt FREUND (1972, S. 91), dass Vibrationen des Kühlaggregates ein Zustandekommen von grösseren Kammeisnadeln verhindern. Um dem vorzubeugen, brachte ich zwischen der Wanne mit dem Probenmaterial und dem Trägerrost eine Schicht aus weichen Kunstschaum- und Textilmatten an, welche die Erschütterungen fast völlig absorbierten.

1.2. Temperaturmessungen

Verglichen mit den Aufnahmen am Sattelplateau des Kilimanjaro standen mir im Labor mehr und bessere Messgeräte zur Verfügung. Elektronische Thermofühler (Fabrikat BRAUN) mit einer Messfläche von 4 mm^2 erlaubten das Ablesen der Temperaturen ausserhalb des Kühlschranks mit einer Genauigkeit von $\pm 0.5^\circ \text{ C}$, was vorgängige Eichungen ergeben haben. Die Messgeräte waren auf einer Trägerlatte montiert und liessen sich für die photogrammetrischen Messaufnahmen rasch entfernen und nachher wieder an der gleichen Stelle fixieren. Die Temperaturen wurden in folgenden Höhen gemessen: 5 und 1 cm über sowie an der Bodenoberfläche, und 1, 5 und 10 cm im Boden. Zudem mass ein Fühler die Werte ausserhalb der Wanne, um die Temperatur im Kühlschrank zu kontrollieren.

1.3. Die photogrammetrischen Aufnahmen

Bei den Aufnahmen am Kilimanjaro waren kurze Streichholzstücke als Testpunkte in Reihen über die Bodenfläche verteilt. Im Laborversuch verwendete ich stattdessen runde Marken aus weissem Halbkarton von 5 mm Durchmesser. Sie wurden vor dem Versuch in Form einer "Matrix" von acht Zwölferreihen über die Fläche verteilt. Jede Marke trug eine in der Vergrösserung des Stereoauto-graphen lesbare Nummer. Auf diese Weise war sichergestellt, dass bei der Registrierung der Einzelmodelle keine Punkte verwechselt wurden (Photo 11). Es hat sich nämlich gezeigt, dass schon beim Wachsen der Eisnadeln vereinzelter Kartonstücke von den emporgehobenen Erdkrümeln abrutschten und in den Photos nicht mehr zu sehen waren. Besonders beim Abtauen mischten die umstürzenden Nadeln die Testmarken zum Teil stark durcheinander. Selbst wenn am Ende eines Versuchs nur noch wenig mehr als die Hälfte der Punkte identifiziert werden konnte, dürfen

jedoch vor allem Vertikalbewegungen als repräsentativ für die Gesamtfläche gelten (vgl. S. 51 f.).

Während der ganzen Aufnahmereihe blieb das Stativ mit der angekuppelten Stereokamera in der gleichen Stellung verankert. Die Aufnahmerichtung war stets lotrecht. Für die Aufnahmen wurde die Wanne in einen festen Rahmen unter der Kamera eingepasst. Dieser Rahmen konnte für Kammeisversuche mit geneigter Bodenfläche um die gleichen Winkel gekippt werden wie die Wannenhalterung im Thermoschrank. Bestimmte Punkte auf einem an der Wanne angebrachten Massstab dienten zur Einpassung und Ausrichtung aller Modelle bei der Auswertung. Die Längenänderung des Massstabes infolge von Temperaturschwankungen war vernachlässigbar klein.

Die für das Ausrichten der Wanne und die Aufnahmen benötigte Zeit betrug weniger als eine halbe Minute. In dieser kurzen Zeit beeinträchtigte der Wechsel zwischen Kühlschranks- und Raumtemperatur das Experiment nicht; sogar an den filigranen Eisnadeln war keine Veränderung zu erkennen.

1.4. Die photogrammetrische Ausmessung

Vor der Ausmessung wurden alle Aufnahmepaare nach den gleichen festen Passpunkten ausgerichtet, um die einzelnen Modelle untereinander vergleichen zu können. Die Testpunkte lagen - zumindest zu Beginn der Aufnahmereihe - in Form einer 8 x 12 "Matrix" angeordnet. Sofern im Stereomodell die Punktnummern sicher identifiziert werden konnten, registrierte ich sie zusammen mit den Lage- und Höhenkoordinaten in einem rechtwinkligen Auswertekoordinatensystem mit lotrechter Höhenachse z. Die Messmarke des Autographen wurde dabei auf die Mitte der sich gut vom Probenmaterial abhebenden Papierscheibchen aufgesetzt. Aus der Aufnahmedistanz und der Ungenauigkeit beim Einstellen eines Punktes ergab sich an Lage und Höhe ein mittlerer Fehler von höchstens ± 1 mm. Verdeckte Testpunkte, auf denen entweder die Numerierung nicht zu lesen war, oder bei denen die Messmarke nicht sicher auf die Mitte eingestellt werden konnte, erhielten eine besondere Kennzeichnung und schieden bei den folgenden Vergleichsrechnungen aus.

1.5. Die Verarbeitung der Registrierwerte

Die Disposition der registrierten Koordinatenwerte mit Modell - und Punkt-nummern gestattete es, Lageänderungen sowohl einzelner Testpunkte als auch des gesamten Feldes zwischen beliebigen Aufnahmen zu bestimmen. Von besonderem Interesse war der Vergleich zwischen der Ausgangslage der Testpunkte, ihrer maximalen Hebung und der Endlage nach Abschmelzen der Kammeisnadeln.

1.6. Ergebnisse

Es stellte sich heraus, dass in erster Linie die Temperatur an der Bodenoberfläche das Wachsen des Kammeises beeinflusst. Wie auch die Felduntersuchungen am Kilimanjaro ergeben haben, setzt die Bildung der Eisnadeln ein, nachdem die Temperatur an der Bodenoberfläche unter 0°C gesunken war. Wegen der die Verdunstung verhindernden Plastikfolie dauerte es länger als in der Natur unter denselben Temperatureinflüssen, bis das Hebungsmaximum des Kammeises erreicht war. Hingegen spielte sich das Abschmelzen nach Entfernen der Plastikfolie in der gleichen Zeitspanne ab, wie in der Natur; es vergingen etwa drei Stunden vom Beginn des Umkippen der Eisnadeln, bis das gesamte Probenmaterial wieder völlig aufgetaut war.

1.6.1. Kammeis auf horizontaler Bodenfläche

Figur 15 zeigt die durchschnittlichen vertikalen Bewegungen der vom Wachsen und Abschmelzen des Kammeises verfrachteten Bodenpartikel. Die durchschnittliche maximale Hebung dieser Erdkrümel betrug $19\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$. Der aus den Messwerten bestimmte durchschnittliche Höhenunterschied der Testpunkte von 0.4 mm zwischen Anfangs- und Endlage war kleiner als der mittlere Fehler der Messungen ($\pm 1\text{ mm}$). In horizontaler Richtung hatten sich die Punkte allerdings um 6 mm verschoben (Mittel der Lageänderungen der miteinander verglichenen Testmarken gegenüber der Ausgangslage). Diesem Wert muss aber Zufälligkeitscharakter zugebilligt werden. Wenn man nämlich die Hebung der obersten Erdkrümel bei horizontaler Bodenoberfläche betrachtet, so darf ein durchschnittlicher Wert der etwa 50

immer identifizierbaren Punkte als repräsentativ gelten, weil ihre Bewegung für die Mehrzahl der Marken gleich verläuft, d.h. senkrecht zur Bodenfläche in Richtung des Eisnadelwachstums. Anders sieht es jedoch beim Schmelzen der Eisnadeln aus. Sie tauen zuerst an ihrer Basis ab und fallen dann, keine Richtung bevorzugend, durcheinander. Dabei gelangen die ihnen aufsitzenden Erdkrümel kaum in die Ausgangslage vor der Hebung zurück. Es kann zwar bei 50 eingemessenen Testpunkten durchaus vorkommen, dass eine gewisse Fallrichtung der Nadeln vorherrscht. Da jedoch auf das ganze Probenfeld die gleichen Auftaubedingungen einwirkten, ist eine als Durchschnitt bestimmte Horizontalverschiebung zwischen Anfangs- und Endlage rein zufällig.

1.6.2. Kammeis auf geneigter Bodenfläche

Die Messungen an dem um 3° geneigten Kammeisfeld am Sattelplateau des Kilimanjaro haben gezeigt, dass beim Abschmelzen der Eisnadeln eine Verlagerung der gehobenen Erdkrümel in Falllinienrichtung stattfindet (vgl. S.52 und 53). Dieses Ergebnis beruhte auf dem Durchschnitt der Verschiebungen aller ausgemessenen Testpunkte.

Im Laborexperiment ging es darum, beim Wachsen der Kammeisnadeln ihre Richtung bezüglich einer geneigten Bodenoberfläche festzustellen, sowie die Verschiebung der Testpunkte von der Ausgangs- in die Endlage zu ermitteln. Für den Versuch wurde der Trägerrost im Thermoschrank und der Einpassrahmen unter der Stereokamera um 10° geneigt. Gegenüber den Untersuchungen bei horizontaler Bodenoberfläche änderte sich sonst nichts an der Durchführung des Experimentes. Bei der photogrammetrischen Ausmessung lag die in die x-y-Horizontalebene projizierte Falllinie des Testfeldes parallel zur y-Achse des Auswertekoordinatensystems.

Wenn man annimmt, dass die Kammeisbüschel senkrecht zur Bodenfläche stehen (FURRER, 1955, S. 194 f.), so lässt sich die Länge der Eisnadeln (H) aus der Vertikaldifferenz (Δz) und dem Cosinus der Hangneigung (α) bestimmen: $H = \frac{\Delta z}{\cos \alpha}$. Unter derselben Annahme müsste die Berechnung der Nadellängen aus den Horizontaldifferenzen Δx und Δy und der Vertikaldifferenz Δz der registrierten Testpunkte zum gleichen Ergebnis führen: $H = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$.

Bei maximaler Hebung des Testfeldes betrug die durchschnittliche Vertikal-komponente (Δz) $19 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Die Berechnung mit dem Cosinus des Hangneigungs-winkels (α) ergab 19.3 mm für die mittlere Eismadellänge; aus der Längenbe-stimmung mit den Horizontalkomponenten (Δx und Δy) resultierten 19.7 mm . Die Differenz zwischen den beiden Werten ist kleiner als der mittlere Messfehler von $\pm 1 \text{ mm}$. Bemerkenswert ist jedoch das Auftreten einer mittleren Horizontal-komponente Δx von 4 mm quer zur Richtung der Fallinie. Das bedeutet, dass zu-mindest nicht alle Kammeisnadeln senkrecht zur Bodenfläche stehen. Besonders wenn Kammeis in dichten zusammenhängenden Büscheln auftritt, konnte ich Ver-biegungen infolge unregelmässigen Wachsens der Nadeln beobachten. Dabei werden die emporgehobenen Erdkrümel und Steinchen auch seitlich oder sogar hangauf-wärts bewegt. Vor allem an "dirty needles" (OUTCALT, 1971, S. 369) zeigen sich diese Unregelmässigkeiten.

Die Gesamtverschiebung der obersten "Bodenschicht" im Verlauf des Gefrier-Abtauprozesses wurden aus den Anfangs- und Endlagen der 56 identifizierbaren und verglichenen Testpunkte bestimmt. Entlang der um 10° geneigten ebenen Bodenfläche wurden die Punkte um durchschnittlich $4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ hangabwärts verfrachtet. *)

*) Am Testfeld vom Kilimanjaro wurde eine mittlere Verschiebung der Testpunkte um 2 mm hangabwärts festgestellt. Die maximale Eismadellänge von 20 mm war praktisch gleich wie im Modellversuch. Beim Vergleich der Hangneigungswinkel (3° und 10°) und der Transportstrecken (2 mm und 4 mm) ergibt sich für das schwächer geneigte Feld vom Kilimanjaro eine verhältnismässig weitere Ver-lagerung. Der Grund liegt meines Erachtens in der unterschiedlichen Ausbil-dung und Stabilität der Eismadeln. Die in den Tropen beobachteten Nadeln waren filigraner und seltener seitlich zusammengewachsen in Büscheln ver-einigt. Beim Umstürzen stiessen sie - in einem gleichmässig erwärmten Feld - auf wenig Widerstand und beförderten so die Erdkrümel an ihren Spitzen relativ weit. Im durchgeführten Modellversuch dagegen waren die Eismadel-büschel viel massiger und standfester. Dies hemmte das freie Umkippen der Nadeln und verhinderte weitgehend auch das Mitreißen benachbarter Kammeis-säulen.

Die berechnete seitliche Gesamtverschiebung der Testpunkte betrug $3 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ in y-Richtung. Vergleicht man diesen Betrag mit der entsprechenden Horizontalkomponente zur Zeit der maximalen Hebung des Testfeldes ($\Delta x = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$), so liegt die Vermutung nahe, dass vor allem die Schwerkraft bei geneigter Oberfläche die Richtung bestimmt, in welcher die emporgehobenen Erdkrümel beim Abschmelzen der Eisnadeln abgesetzt werden.

1.7. Zusammenfassung der Ergebnisse

- Die Temperatur an der Bodenoberfläche beeinflusst vor allem das Wachstum des Kammeises.
- "Clear needles" (OUTCALT, 1971, S. 395 f.) scheinen sich vorwiegend gerade und senkrecht zur Bodenfläche zu entwickeln, "dirty needles" dagegen bilden sich häufig gebogen aus und neigen ausserdem zu massiger Büschelbildung.
- Beim Abtauen der Kammeisnadeln auf geneigten Flächen bestimmt in erster Linie die Schwerkraft die Fallrichtung der emporgehobenen Erdkrümel.
- Die Transportstrecke der vom Kammeis gehobenen obersten "Bodenschicht" in Richtung der Falllinie ist abhängig vom Hangneigungswinkel, von der Stabilität der Eisnadeln und ihrer Länge.

E. ERGEBNISSE UND AUSBLICK

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Nahbereichs-Stereophotogrammetrie die eingangs an sie gestellten Forderungen erfüllt und dass sich die verwendeten Instrumente bewähren. Mit Hilfe dieser Methode ist es möglich, alle Einzelheiten der Oberflächengestalt frostgemusterter Böden mit geringstem Zeitaufwand objektiv und genau festzuhalten. Die Auswertarbeit erfolgt zu beliebigen Zeiten im Büro und daher völlig unabhängig von Witterungseinflüssen. Dank der Stereoskopie erscheint der Bildinhalt bei der Betrachtung im Auswertegerät räumlich und zudem überhöht. Das ermöglicht detailliertes Beobachten, Interpretieren und Kartieren sowie Messungen mit einer Genauigkeit, die im Feld niemals ebenso rationell und zuverlässig erreicht wird. Bewegungen und rasch ablaufende Oberflächenveränderungen lassen sich durch Bildreihen mit den gleichen Aufnahmegeräten erfassen. Die nach festgelegten Kriterien gewonnenen Messresultate sind miteinander vergleichbar.

Die Untersuchungen erbrachten - zusammengefasst - folgende Ergebnisse:

Steinringe

Bei den Steinringen auf Spitzbergen sind die Feinerderadien und die Steinrahmenbreiten im Durchschnitt etwa gleich gross. In den Schweizer Alpen dagegen weisen die Steinrahmen vergleichsweise grössere Breiten auf, die sogar bis $\frac{4}{5}$ des gesamten Formradius erreichen. Sowohl bei den alpinen als auch bei den arktischen Formen überragen die Feinerdezentren die sie umgebenden Steinrahmen in der Mehrzahl der Fälle. Alle ausgemessenen Feinerdeflächen sind mehr oder weniger stark konvex gewölbt. Aktive und inaktive Formen (im Sinn von SCHENK, 1955, S. 13 f.) können allein aufgrund der sommerlichen Oberflächenwölbung nicht unterschieden werden.

Erdknospen

Die Verhältnisse zwischen den Feinerderadien und den Breiten der Feinkieswälle liegen bei Erdknospen ähnlich wie bei den Grossformen der Steinringe. Die Erdknospen der Arktis sind von Schuttrahmen eingefasst, deren Breite etwa gleich gross ist wie der Feinerderadius. Bei den entsprechenden Formen der Alpen liegt das mittlere Verhältnis zwischen Feinerderadius und Breite des Steinkranzes bei

2 : 3. Um die Erdknospen vom Kilimanjaro liessen sich keine wulstförmigen Steinumrahmungen der Feinerde deutlich abgrenzen. Die Feinerdeflächen - die eigentlichen Erdknospen - sind am Kilimanjaro nur ungefähr halb so gross wie in beiden anderen Untersuchungsgebieten; sie zeichnen sich jedoch durch eine vergleichsweise stärkere Oberflächenkrümmung aus. Verglichen mit den arktischen Formen zeigen die Erdknospen der Alpen bei gleicher horizontaler Ausdehnung eine kräftigere Aufbeulung der Feinerde.

Erdstreifen

Die am Sattelplateau des Kilimanjaro beobachteten Erdstreifen mit den dazwischenliegenden Steinstreifen sind deutlich schmäler als die analogen Formen der Alpen oder West-Spitzbergens, welche sind grössenmässig weitgehend entsprechen. In allen drei Klimabereichen verflachen sich die im Querprofil stets konvexen Erdstreifen mit zunehmender Streifenbreite. Die zwischengelagerten Schuttbänder erscheinen sowohl konvex als auch konkav ausgebildet. Der Erdstreifenverlauf richtet sich zwar vorwiegend nach der Falllinie des Hanges ; man kann jedoch feststellen, dass die Streifen nicht streng parallel gehen, sondern sich auch verzweigen und zusammenlaufen können.

Kammeis

Die Nahbereichsphotogrammetrie hat sich auch für Bewegungsmessungen in der Natur und im Tieftemperaturlabor sehr gut bewährt. Es konnten Hebungs- und Verschiebungsbeträge der vom Kammeis bewegten Bodenpartikel ermittelt werden. Die Laborexperimente unter kontrollierten Bedingungen erlaubten Vergleiche mit den in der Natur angestellten Untersuchungen. Dabei hat sich gezeigt, dass vor allem die Temperatur an der Bodenoberfläche das Wachsen des Kammeises beeinflusst. Die Eisnadeln wachsen vorwiegend gerade und senkrecht zur Bodenfläche; unter gewissen Umständen sind sie jedoch auch unregelmässig gebogen. Auf geneigten Flächen ist die Schwerkraft richtungsbestimmend für das Ablagern der vom Kammeis gehobenen Erdkrümel. Die Transportstrecke hängt im wesentlichen vom Hangneigungswinkel, der Stabilität der Eisnadeln und ihrer Länge ab.

Feldbeobachtungen am Sattelplateau des Kilimanjaro brachten einen neuen Aspekt zu den von TROLL (1944) postulierten "windgestreiften Auffrierböden". Massgebend für die Streifung eines Kammeisfeldes ist das Wechselspiel zwischen Schlagschatten - beispielsweise von Grasbüscheln - und den ersten, das Feld treffenden Sonnenstrahlen.

Die heute verfügbaren Aufnahmegерäte gestatten pro Bildpaar Flächen von einem bis mehreren Quadratmetern zu erfassen. Kleinformen (z.B. Erdknospen) lassen sich deshalb in grosser Anzahl mit verhältnismässig wenig Aufwand abbilden; bei Grossformen wie beispielsweise Steinringen ist jeweils nur die Aufnahme und Detailausmessung einer einzigen Form möglich. Um jedoch auch ausgedehntere Flächen gemusterter Böden aufzunehmen und eine Grosszahl von Einzelformen gesamthaft darstellen zu können, wird man von der Nahbereichsphotogrammetrie zur Luftphotogrammetrie übergehen müssen.

Die Luftphotogrammetrie vermag mit grossmassstäblichen Stereoluftbildern auch umfangreichere Strukturbodenfelder zu erfassen. Dabei sind Aufnahmeobjektiv und Flughöhe so zu wählen, dass die Einzelform noch klar zu erkennen und ausmessbar ist. Für grössere Bildmassstäbe wird sich der Helikopter als Aufnahmeflugzeug eignen, bei kleineren Massstäben wählt man die üblichen Vermessungsflugzeuge. Die relativ hohen Befliegungskosten schränken allerdings den Einsatz der Luftbildmessung stark ein.

Vom Geographischen Institut der Universität Zürich sind für die nächste Zeit Bildflüge zu Interpretationszwecken geplant, die gestatten werden, meine Untersuchungen auf grossflächige Vorkommen von Strukturböden auszudehnen.

LITERATURVERZEICHNIS

- Blüthgen, J. Allgemeine Klimageographie.
1964, Berlin, Lehrbuch d. allg. Geogr., Bd. II.
- Boesch, H. Einige Bemerkungen zum Periglazialbegriff.
1960, Basel, Regio Basiliensis, Heft 1/2.
- Bryan, K. Cryopedology - The study of frozen ground and intensive frost
action with suggestions on nomenclature.
- Büdel, J. Periodische und episodische Solifluktion im Rahmen der klimati-
schen Solifluktionstypen.
1959, Bonn, Erdkunde, Bd. 13.
- Die Abtragungsvorgänge in der exzessiven Talbildungszone
Südost-Spitzbergens.
1969, prov. Manuskript, Ergebn. d. Stauferland-Expedition
1959/60, Heft 1.
- Corbel, J. Les sols polygonaux au Spitsberg.
1960, Lyon, Revue de Géographie, no. 3.
- Czajka, W. Lage und Materialbestimmtheit von Frostmusterböden,
1958, Festschrift Kinzl.
- Elsasser, H. Untersuchungen an Erdbülten und Strukturböden im Avers.
1966, Zürich, Dipl.arb. (Manuskript), Geogr. Inst. d. Univ.
Zürich.
- Untersuchungen an Strukturböden im Kanton Graubünden.
1968, Zürich, Diss. Univ. Zürich.
- Fitze, P. Untersuchungen von Solifluktionerscheinungen im Alpenquerprofil
zwischen Säntis und Lago di Como.
1969, Zürich, Diss. Univ. Zürich.
- Fliri, F. Statistik und Diagramm.
1969, Braunschweig, Westermann; Das Geographische Seminar.
- Flückiger, O. Schuttstrukturen am Kilimanjaro.
1934, Leipzig, Petermanns Geogr. Mitt., Heft 11.
- Freund, R. Solifluktionerscheinungen am Parpaner Rothorn.
1968, Zürich, Dipl.arb. (Manuskript), Geogr. Inst. d. Univ.
Zürich.
- Die Kleinformen der Frostmusterböden: Vergleich Arktis - Alpen -
Tropisches Hochgebirge.
1971, Bern, Geogr. Helv. 4.
- Vergleichende Betrachtung der Kleinformen der Solifluktion im
Raume Mittelbünden (Schweiz), auf West-Spitzbergen und am
Kilimanjaro.
1972, Zürich, Diss. Univ. Zürich.
- Furrer, G. Solifluktionsformen im Schweizerischen Nationalpark.
1954 Liestal, Diss. Univ. Zürich.
- Die Strukturbodenformen der Alpen.
1955. Bern, Geogr. Helv. 4.

- Furrer, G. Untersuchungen am subnivalen Formenschatz in Spitzbergen und in den Bündner Alpen.
1959, Bern, Geogr. Helv. 4.
- Die Höhenlage von subnivalen Bodenformen.
1965, Pfäffikon ZH, Habil. Schrift Univ. Zürich.
- Beobachtungen an rezenten und fossilen (kaltzeitlichen) Struktur-
böden.
1966, Basel, Experientia 22, 489.
- Vergleichenden Beobachtungen am subnivalen Formenschatz in
Ostspitzbergen und in den Schweizer Alpen.
1969, Wiesbaden, Ergebn. d. Stauferland-Expedition 1959/60, Heft 9
- , Bachmann, F., Fitze, P. Erdströme als Formelemente von Solifluktsdecken
im Raum Munt Chavagl/Munt Buffalora (Schweiz. Nationalpark).
1971, Liestal, Ergebn. d. Wiss. Unters. im Schw. Nat. Park,
Heft 65.
- , Freund, R. Beobachtungen zum subnivalen Formenschatz am Kilimanjaro,
1973, Berlin, Zschr. f. Geom., Suppl. Bd. 16.
- Geiger, R. Das Klima der bodennahen Luftschicht.
1961, Braunschweig, Die Wissenschaft, Bd. 73, 4. Aufl.
- Graf, K. Untersuchungen an Solifluktsformen im Raum Ofenpass/Unter-
engadin.
1970, Zürich, Dipl.arb. (Manuskript), Geogr. Inst. d. Univ.
Zürich.
- Beiträge zur Solifluktion in den Bündner Alpen (Schweiz) und in
den Anden Perus und Boliviens.
1971b, Zürich, Diss. Univ. Zürich.
- Högbom, B. Ueber die geologische Bedeutung des Frostes.
1914, Bull. Geol. Inst. Uppsala 12.
- Höllermann, P. Zur Verbreitung rezenter periglazialer Kleinformen in den
Pyrenäen und Ostalpen.
1967, Göttingen, Habil.schrift, Gött. Geogr. Abh., Heft 40.
- Hövermann, J. Ueber Verlauf und Gesetzmässigkeit der Strukturbodengrenze.
1962, Lodz, Biul. Perygl. 11.
- Kelletat, D. Verbreitung und Vergesellschaftung rezenter Periglazialerscheinun-
gen im Apennin.
1969, Göttingen. Gött. Geogr. Abh., Heft 48.
- Rezente Periglazialerscheinungen im Schottischen Hochland.
1970, Göttingen. Gött. Geogr. Abh., Heft 51.
- Klute, F. Ergebnisse der Forschungen am Kilimanjaro.
1912.
- Kreyszig, E. Statistische Methoden und ihre Anwendungen.
1968, Göttingen, Vandenhoeck & Ruprecht Verlag.
- Krumme, O. Frost und Schnee in ihrer Wirkung auf den Boden im Hochtaunus.
1935, Frankfurt a. M., Rhein-M. Forsch., Heft 13.

- Lehmann, G. Photogrammetrie.
1966, Berlin, Sammlung Götschen, Bd. 1188/1188a.
- Louis, H. Allgemeine Geomorphologie.
1963, Berlin, Lehrbuch d. allg. Geogr., Bd. I.
- Machatschek, F. Geomorphologie.
1973, Stuttgart, Teubner Verlag.
- Outcalt, S.I. A Study of Time Dependence During Serial Needle Ice Events.
1970, Wien, Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. A, 19.
- An Algorithm for Needle Ice Growth.
1971, Ann Arbor, Water Resources Research, Vol. 7. No. 2.
- Philbert, K. Recherches sur les sols polygonaux et striés.
1964, Lodz, Biul. Perygl. Nr. 13.
- Poser, H. Beiträge zur Kenntnis der arktischen Bodenformen.
1931, Geol. Rdsch. 22, Heft. 3/4.
- Studien über Periglazialerscheinungen in Mitteleuropa.
1954, Göttinger Geogr. Abh., Heft 15.
- Prechtel, H. Geomorphologische Strukturen.
1965, Tübingen, Tüb. Geogr. Studien, Heft 17.
- Schenk, E. Die Mechanik der periglazialen Strukturböden.
1955, Wiesbaden, Abh. d. Hess. Landesamtes f. Bodenforschung,
Heft 13.
- Schmid, J. Der Bodenfrost als morphologischer Faktor.
1955, Heidelberg.
- Semmel, A. Verwitterungs- und Abtragungserscheinungen in rezenten Peri-
glazialgebieten (Lappland und Spitzbergen).
1969, Würzburg, Würzb. Geogr. Arb., Heft 26.
- Stingl, H. Zur Verteilung von Gross- und Miniaturformen von Strukturböden
in den Ostalpen.
1971, Göttingen, Nachrichten d. Akad. d. Wiss., Math.-Phys. Kl.,
Nr. 2.
- Troll, C. Strukturböden, Solifluktion und Frostklimate der Erde.
1944, Geol. Rdsch. Bd. 34, Heft 7/8.
- Die Formen der Solifluktion und die periglaziale Bodenabtragung.
1947, Bonn, Erdkunde, Bd. 1, Lief. 4/6.

LEBENS LAUF

Am 20. Juni 1944, wurde ich, Gerhard Hugo Kasper, in Brünn (Tschechoslowakei) geboren. Seit 1948 lebe ich in der Schweiz und wurde im Jahre 1961 Bürger von Au (SG).

Nach dem Besuch der Primar- und Sekundarschule Heerbrugg (SG) schloss ich am Gymnasium der Kantonsschule St.Gallen im Herbst 1963 mit der Maturität Typ B ab. Es folgten ein dreimontziger Englandaufenthalt und das Absolvieren des Militärdienstes. Anschliessend studierte ich während 4 Semestern an der ETH Zürich insbesondere Vermessung und Photogrammetrie. Im Herbst 1967 begann das Studium am Geographischen Institut der Universität Zürich. Bisher legte ich hier folgende Prüfungen erfolgreich ab: Kartographie (Propädeutikum), Mathematik (2. Nebenfach) und Geologie (1. Nebenfach). Seit drei Jahren arbeite ich als Assistent am Geographischen Institut.

Vorlesungen, Uebungen und Exkursionen besuchte ich bei folgenden Dozenten:

Geographie	Bachmann, Bär, Boesch, Bögli, Furrer, Gensler, Gyan, Haefner, Kaiser, Kishimoto, Schüepp.
Geologie	Bolli, Dal Vesco, Dünner, Gannser, Hantke, Hsu, Trümpy.
Kartographie	Kishimoto, Spiess.
Mathematik	Bauknecht, Matzinger, van der Waerden.
Photogrammetrie	Kasper.
Vermessung	Conzett, Kobold.



Photo 1 : Stereometerkamera WILD C-40 mit elektromagnetischer Verschlussauslösung. Serienmässiges Holzstativ mit ausfahrbarem Standrohr. Aufnahmerichtung horizontal.



Photo 2 : Stereokamera C-40 mit Spezial-
stativ für Senkrechtaufnahmen

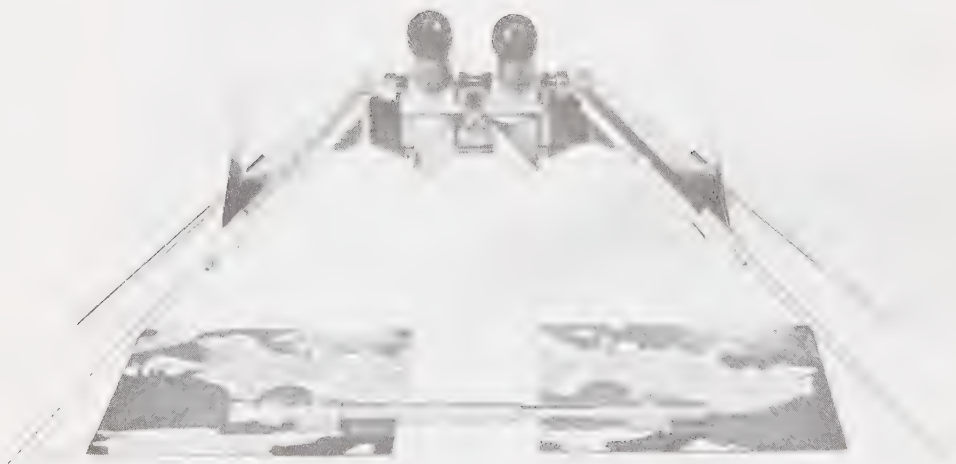


Photo 3 : Spiegelstereoskop WILD mit Vergrößerungsokular.

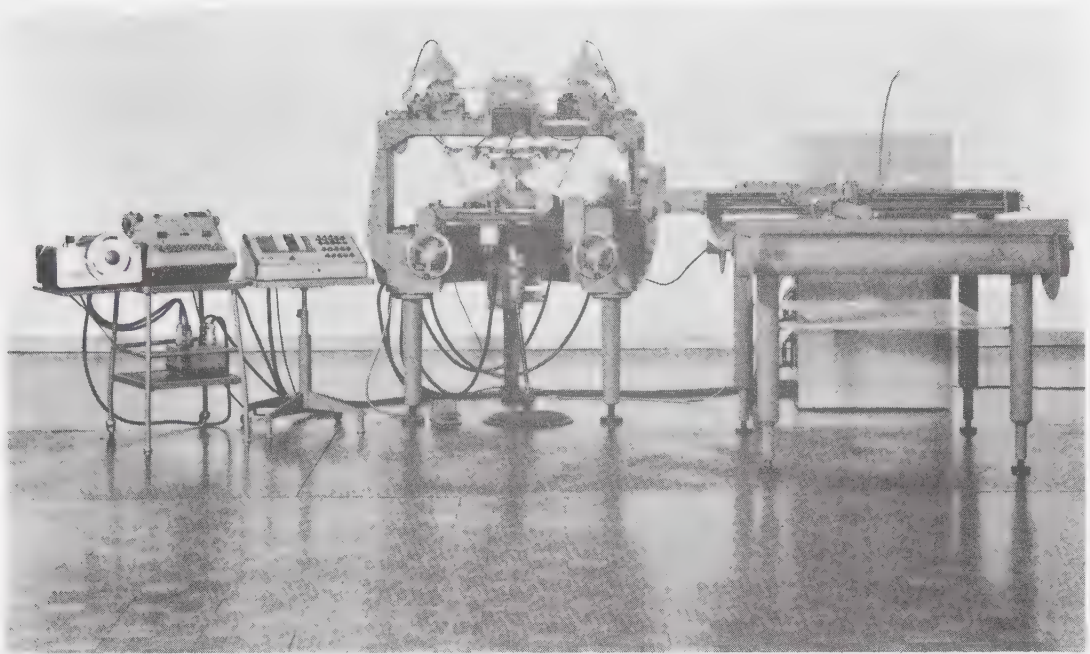


Photo 4 : Stereoautograph WILD A-9 mit Zeichentisch, Koordinatenregistriergerät, elektrischer Schreibmaschine und Streifenlocher.



Photo 5 : Beispiel einer Schrägaufnahme.
Die Aufnahmerichtung schliesst mit der Lotlinie einen Winkel von 30° ein. Die erfasste Fläche ist grösser als bei Senkrechtaufnahmen, doch verdeckt das mitabgebildete Stativbein einen Teil des Bildinhaltes.
(Massstab total 2 m)



Photo 6 : Steinring. Westspitzbergen,
Sverdrup Hamaren, ca. 420 m ü M.
Senkrechtaufnahme. (Massstab
total 2 m)



Photo 7 : Beispiel eines Steinringes.
Westspitzbergen, Nordenskjöld,
ca. 1000 m ü M. (Massstab total
2 m)



Photo 8 : Erdknospen. Sattelplateau Kilimanjaro,
ca. 4300 m ü M.
Die äussere Begrenzung der Kiesrahmen lässt
sich nicht eindeutig festlegen. (Massstab
total 2 m)



Photo 9 : Erdstreifen am Sattelplateau des Kilimanjaro.
Senkrechtaufnahme. Der Pfeil weist hangabwärts.
Hangneigungswinkel 4.5 bis 6.5°. Vergleiche dazu
die photogrammetrische Auswertung in Fig. 9.



Photo 10 : Testfeld der Kammeisbeobachtungen am Sattelplateau
des Kilimanjaro.
Die ausgelegten Streichholzstücke heben sich
deutlich vom Erdmaterial ab. (Massstab total 2 m)



Photo 11 : Kammeis. Versuch im Thermoschrank.
Die Nummern der Plättchen sind bei der
photogrammetrischen Auswertung sichtbar.
(Einheiten des dargestellten Massstabes: cm).

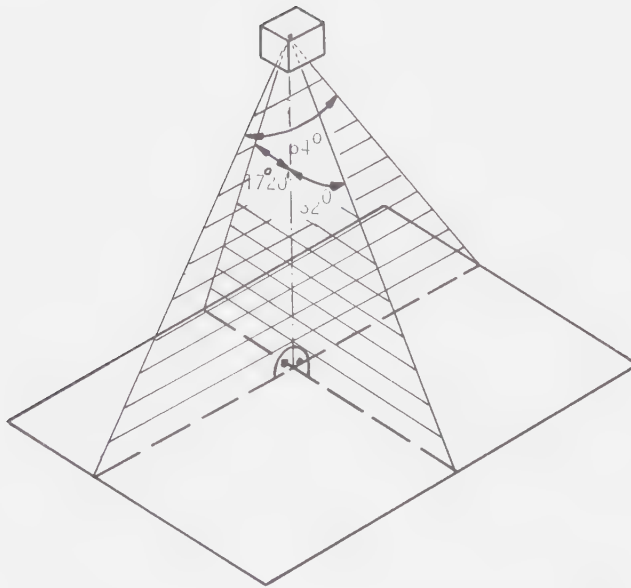


Fig. 1 : Bildwinkel eines C-40 Objektives. Die versetzte Bildhaupthorizontale teilt den Bildwinkel in einen "oberen" von 32° und einen "unteren" von $17^{\circ}20'$. Der seitliche Winkel beträgt 64° .

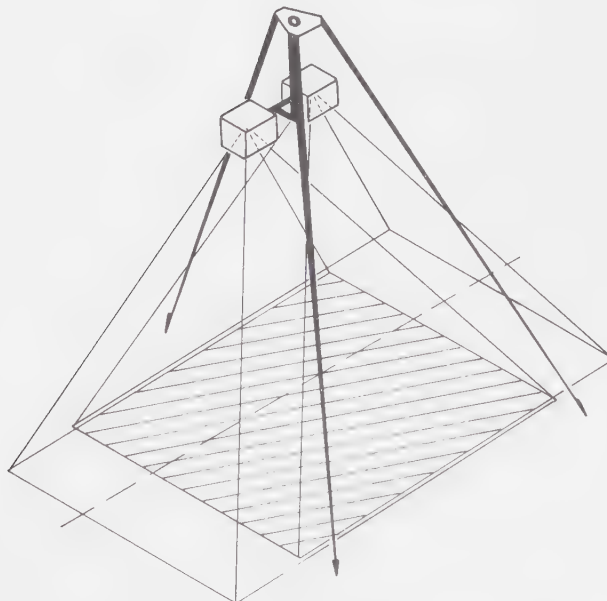


Fig. 2 : Schematische Darstellung der Anordnung der Stereokamera bei Senkrechtaufnahmen. Der Ueberdeckungsbereich beider Bilder ist schraffiert eingezeichnet.

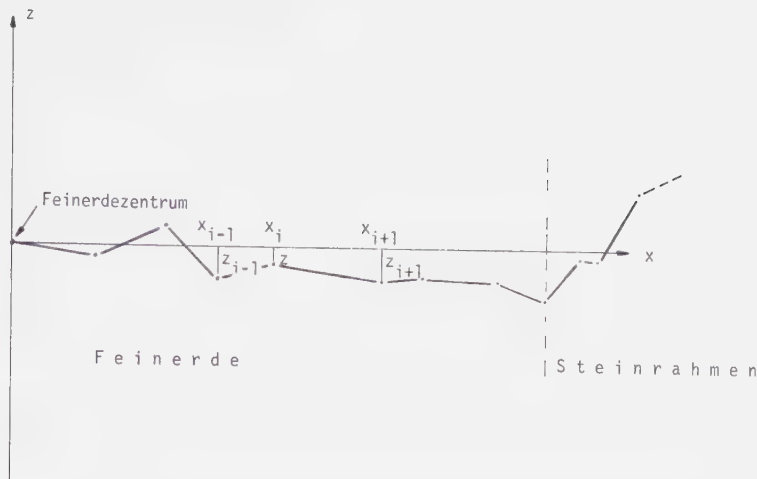


Fig. 3 : Schematische Darstellung der Koordinatenregistrierung entlang eines Radialprofiles über einen Steinring.

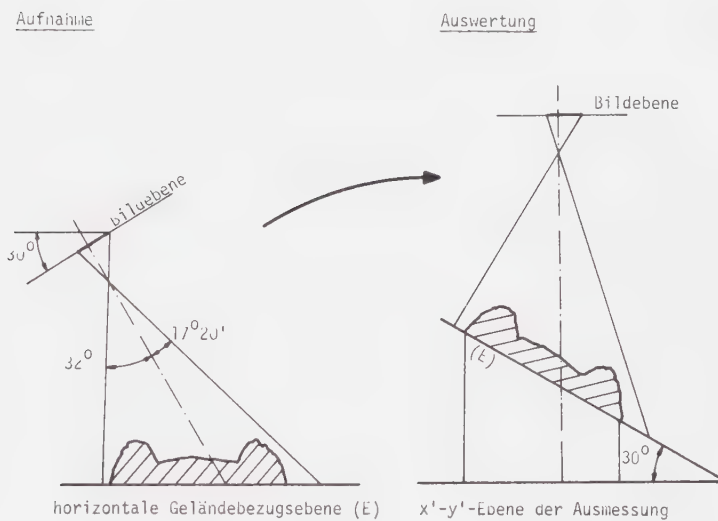
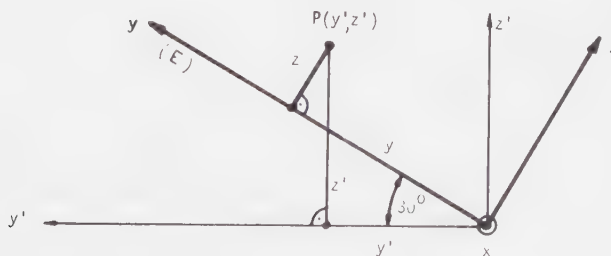


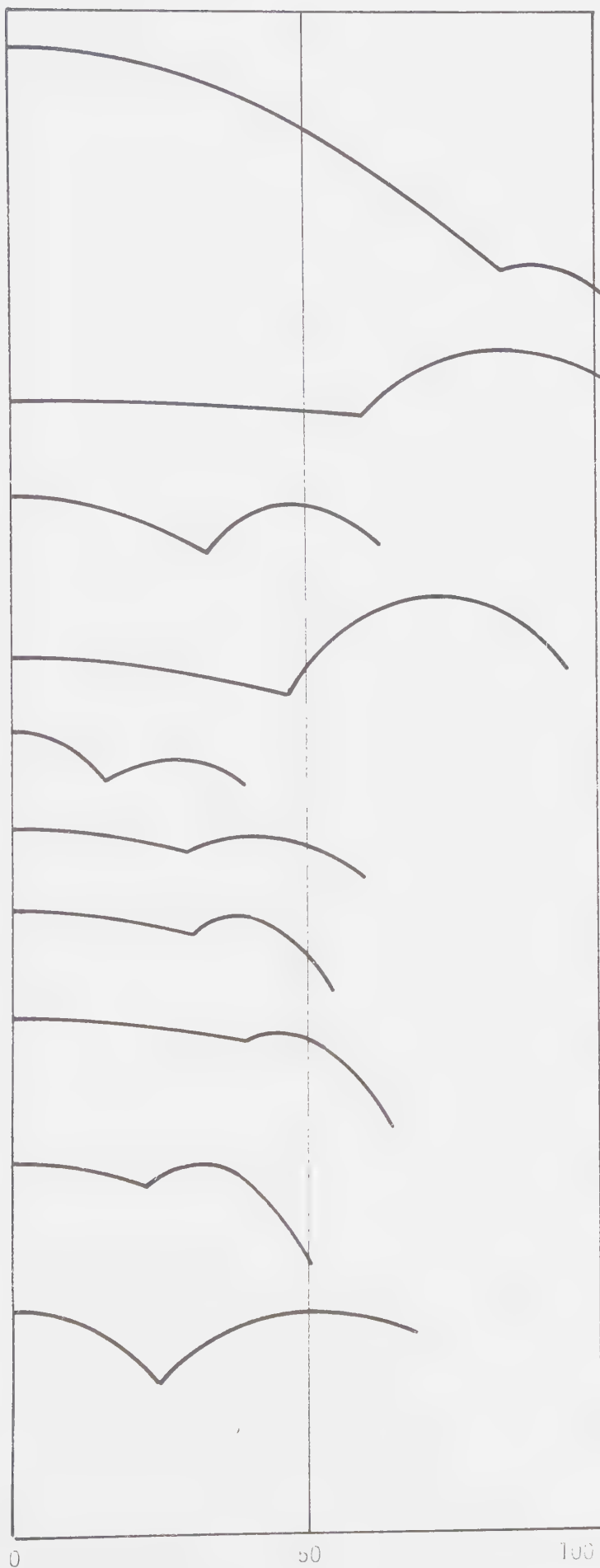
Fig. 4 : Aufnahme und Auswertung bei geneigten Bildern (Vertikalschnitt in y-Richtung senkrecht zur Aufnahmebasis)



$$y = y' \cdot \cos 30^\circ + z' \cdot \sin 30^\circ$$

$$z = z' \cdot \cos 30^\circ - y' \cdot \sin 30^\circ$$

Fig. 5 : Drehung des Auswertekordinatensystems (x - y' - z') um den Neigungswinkel der Aufnahme (30°) um die x -Achse und Transformation der Punkte in das Orthogonalsystem (x - y - z) mit der Geländebezugsebene (E) als neuer "Grundrissebene".



Quadratische Glieder
der normierten Parabeln
über

Feinerde u. Steinrahmen

- 0.0183 - 0.0924

- 0.0029 - 0.0604

- 0.0286 - 0.1127

- 0.0096 - 0.0815

- 0.1131 - 0.0924

- 0.0164 - 0.0677

- 0.0165 - 0.1564

- 0.0004 - 0.1335

- 0.0264 - 0.1746

- 0.0725 - 0.0514

Fig. 6a : Steinringe, Westspitzbergen.
Normierte Parabeln über
Feinerde und Steinrahmen.
(Darstellung dreifach über-
höht)

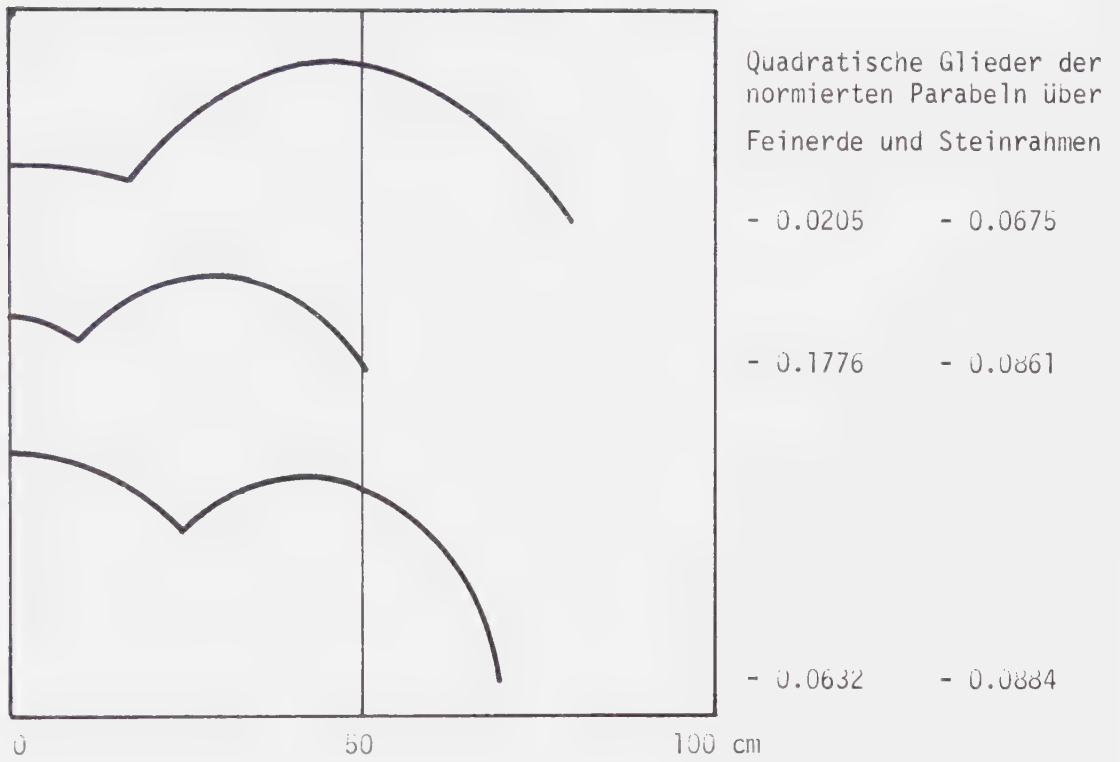
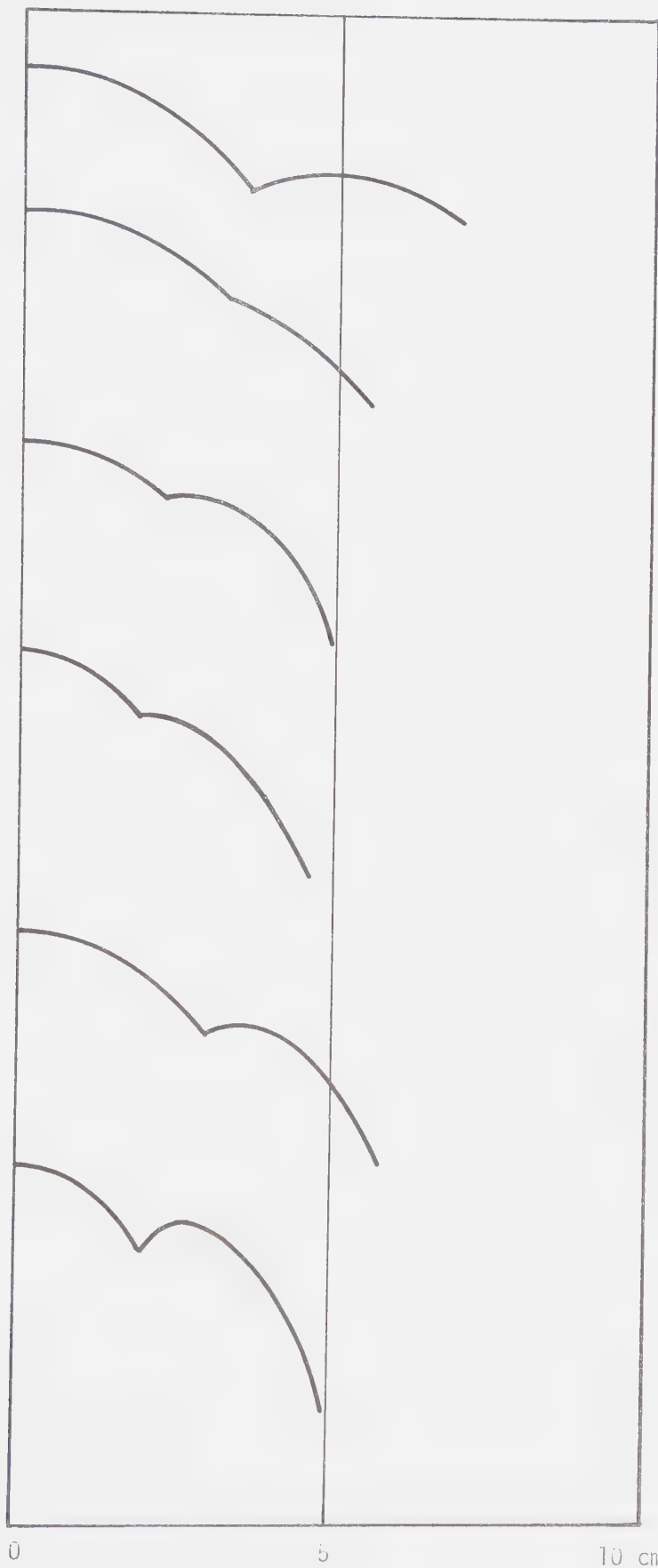


Fig. 6b : Steinringe, Schweizer Alpen. Normierte Parabeln über Feinerde und Steinrahmen. (Darstellung dreifach überhöht)



Quadratische Glieder der
normierten Parabeln über
Feinerde und Steinrahmen

- 0.0492 - 0.0597

- 0.0471 - 0.0483

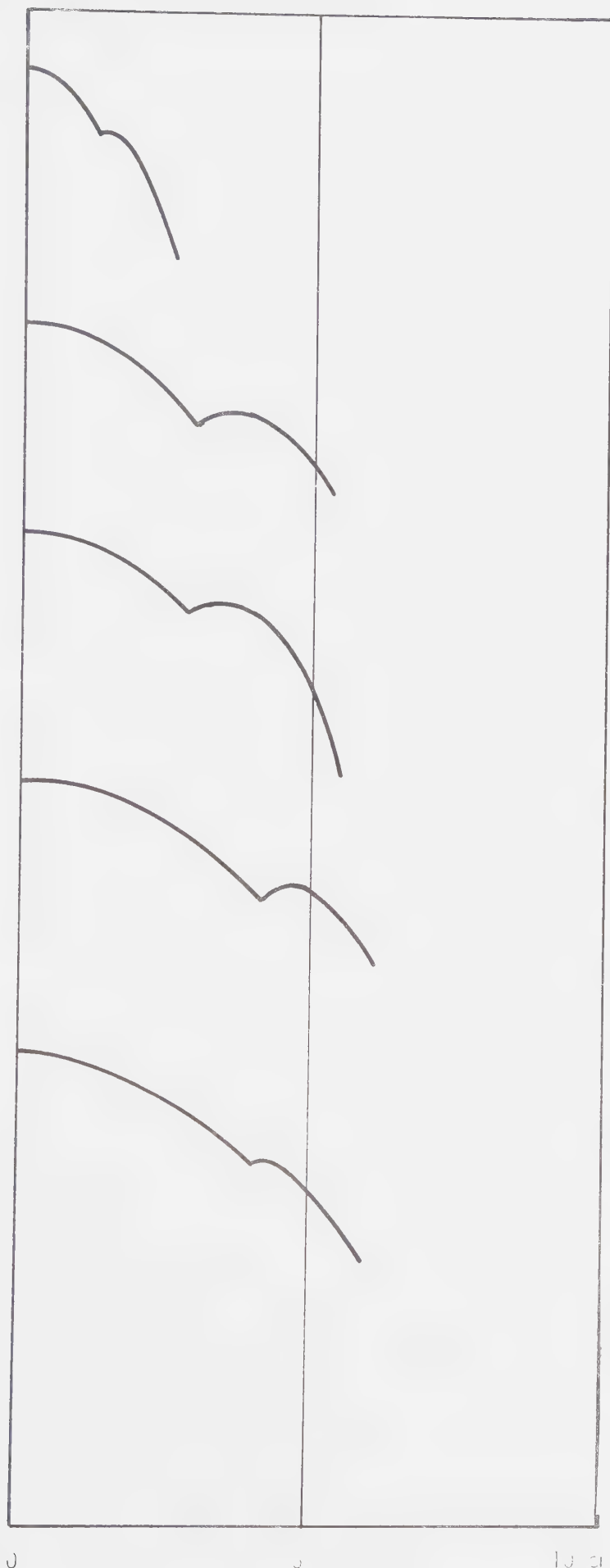
- 0.0616 - 0.1217

- 0.0936 - 0.1137

- 0.0614 - 0.1393

- 0.1167 - 0.2261

Fig. 7a : Erdknospen mit abgrenzbaren Steinrahmen (Spitzbergen). Normierte
Parabeln über Feinerde und Steinrahmen. (Darstellung dreifach
überhöht)



Quadratische Glieder der
normierten Parabeln über
Feinerde und Steinrahmen

- 0.3123 - 0.4814

- 0.0697 - 0.1447

- 0.0519 - 0.2171

- 0.0413 - 0.2191

- 0.0396 - 0.0845

Fig. 7b : Erdknospen mit abgrenz-
baren Steinrahmen (Spitz-
bergen). Normierte Parabeln
über Feinerde und Stein-
rahmen (Darstellung drei-
fach überhöht)

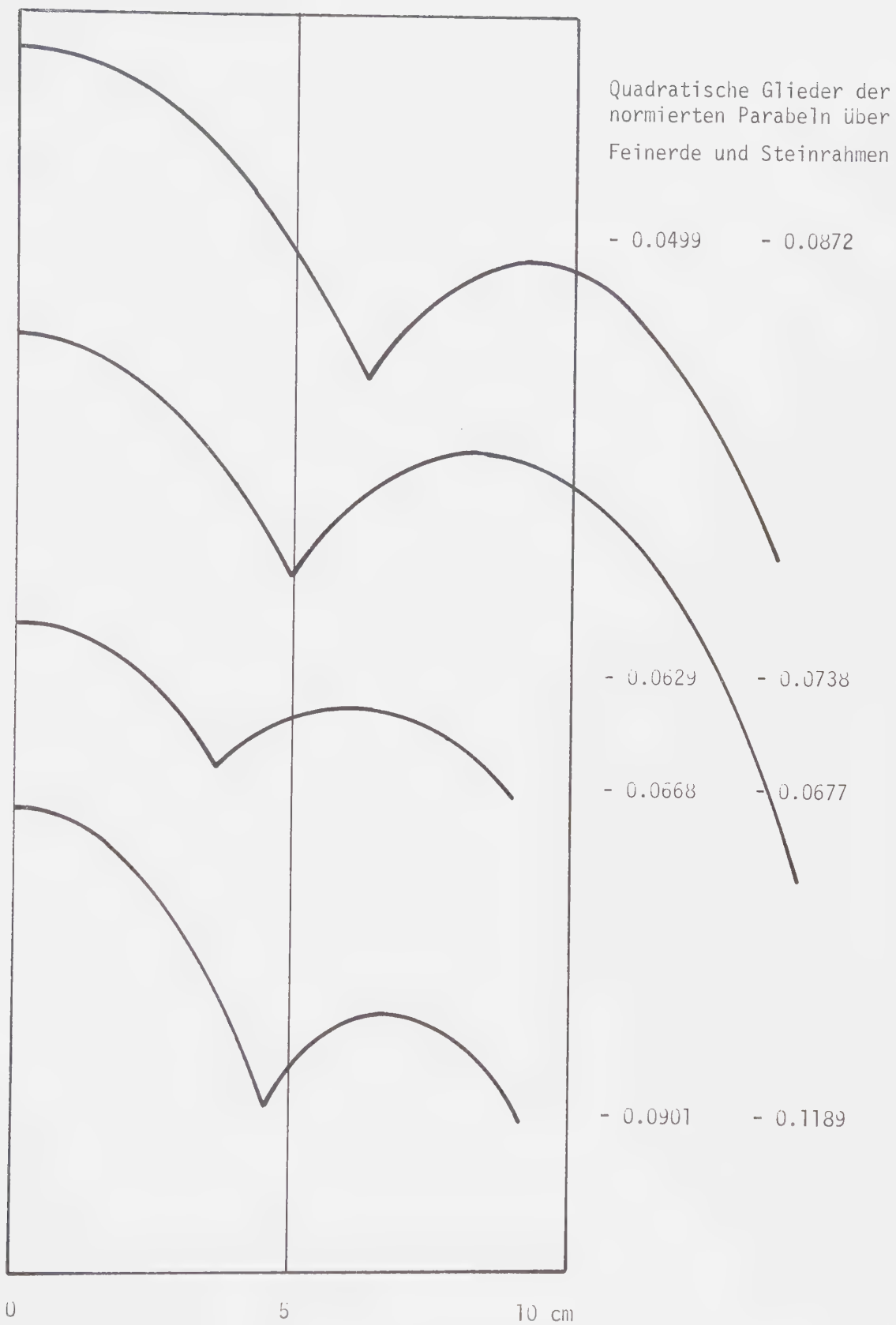
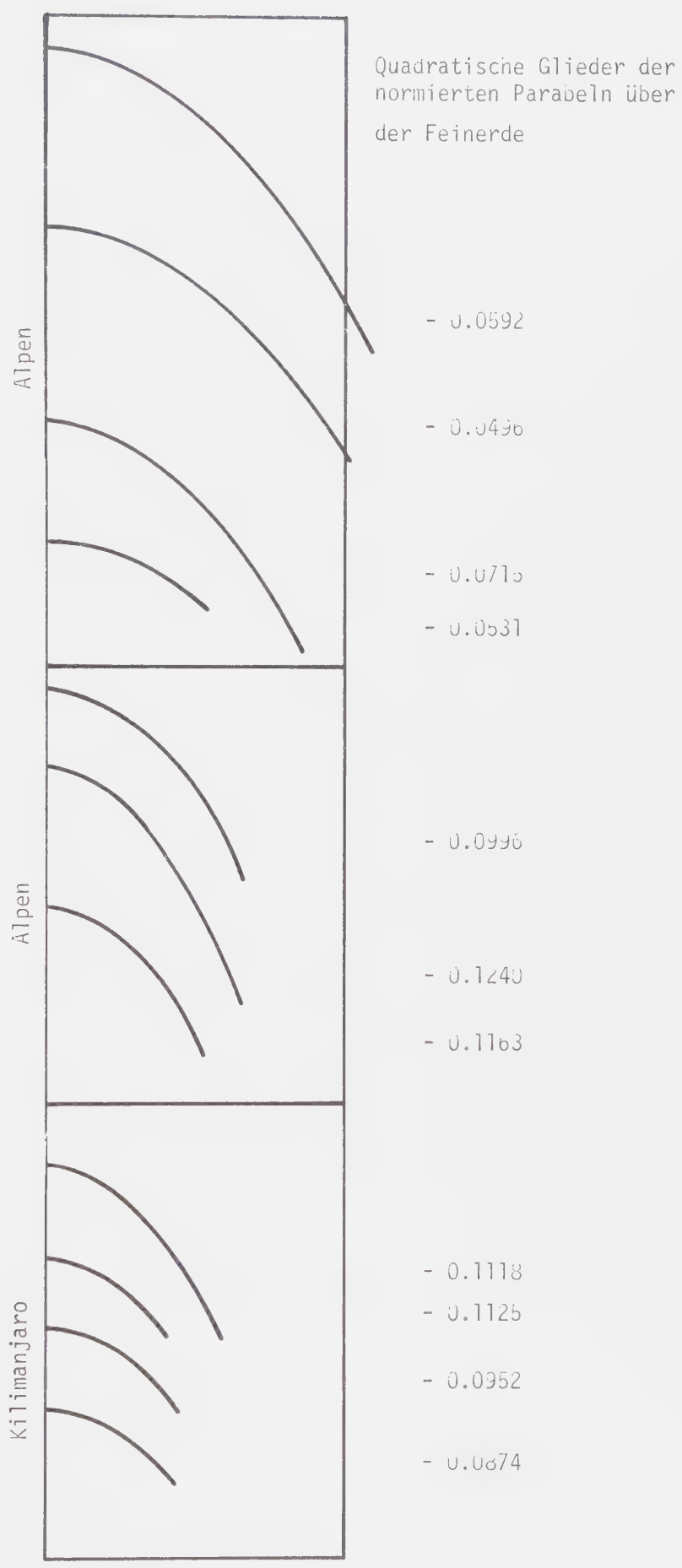


Fig. 7c : Erdknospen mit abgrenzbaren Steinrahmen (Alpen), normierte Parabeln über Feinerde und Steinrahmen (Darstellung dreifach überhöht)

Fig. 7d :
 Erdknospen ohne abgrenz-
 are Steinrahmen.
 Normierte Parabeln über
 der Feinerde. (Darstellung
 dreifach überhöht)



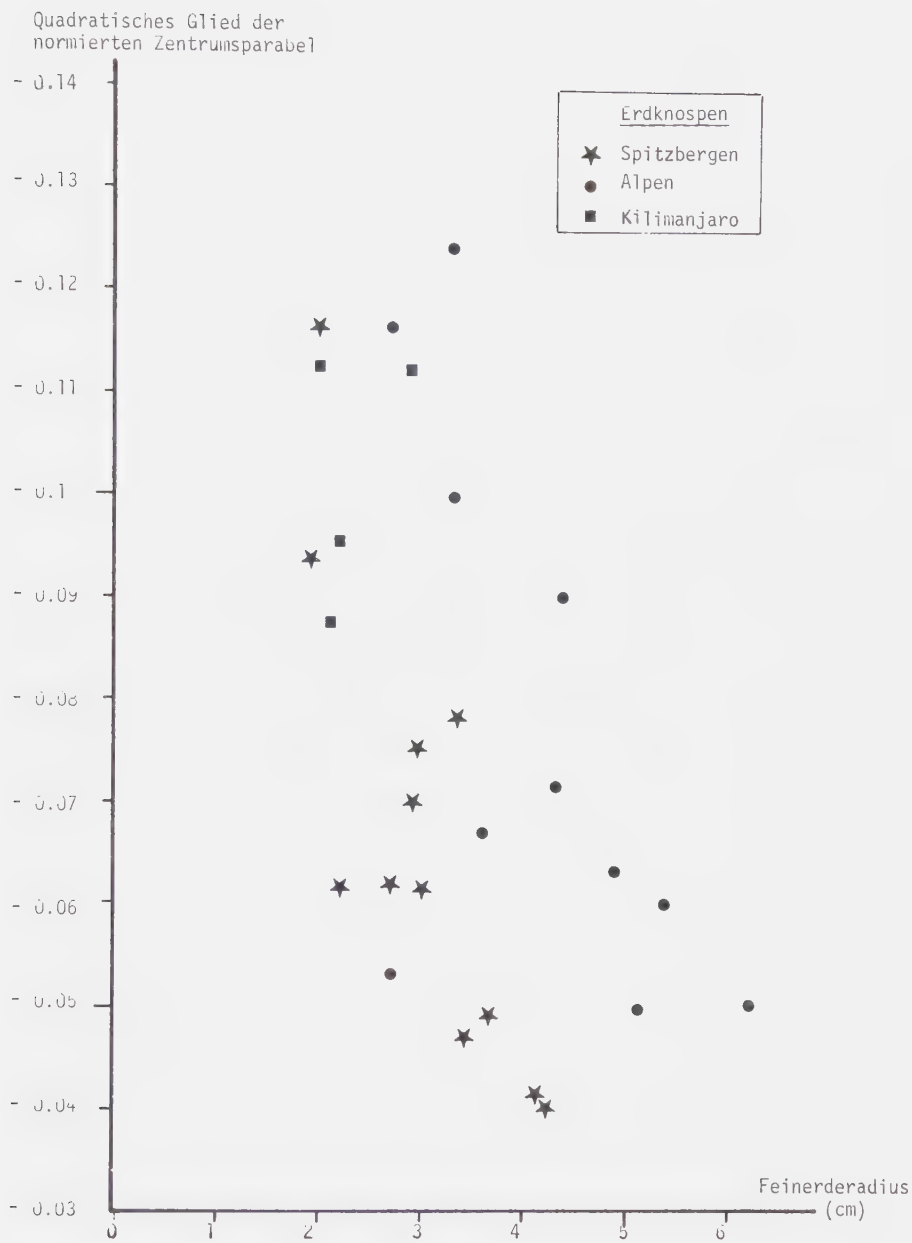
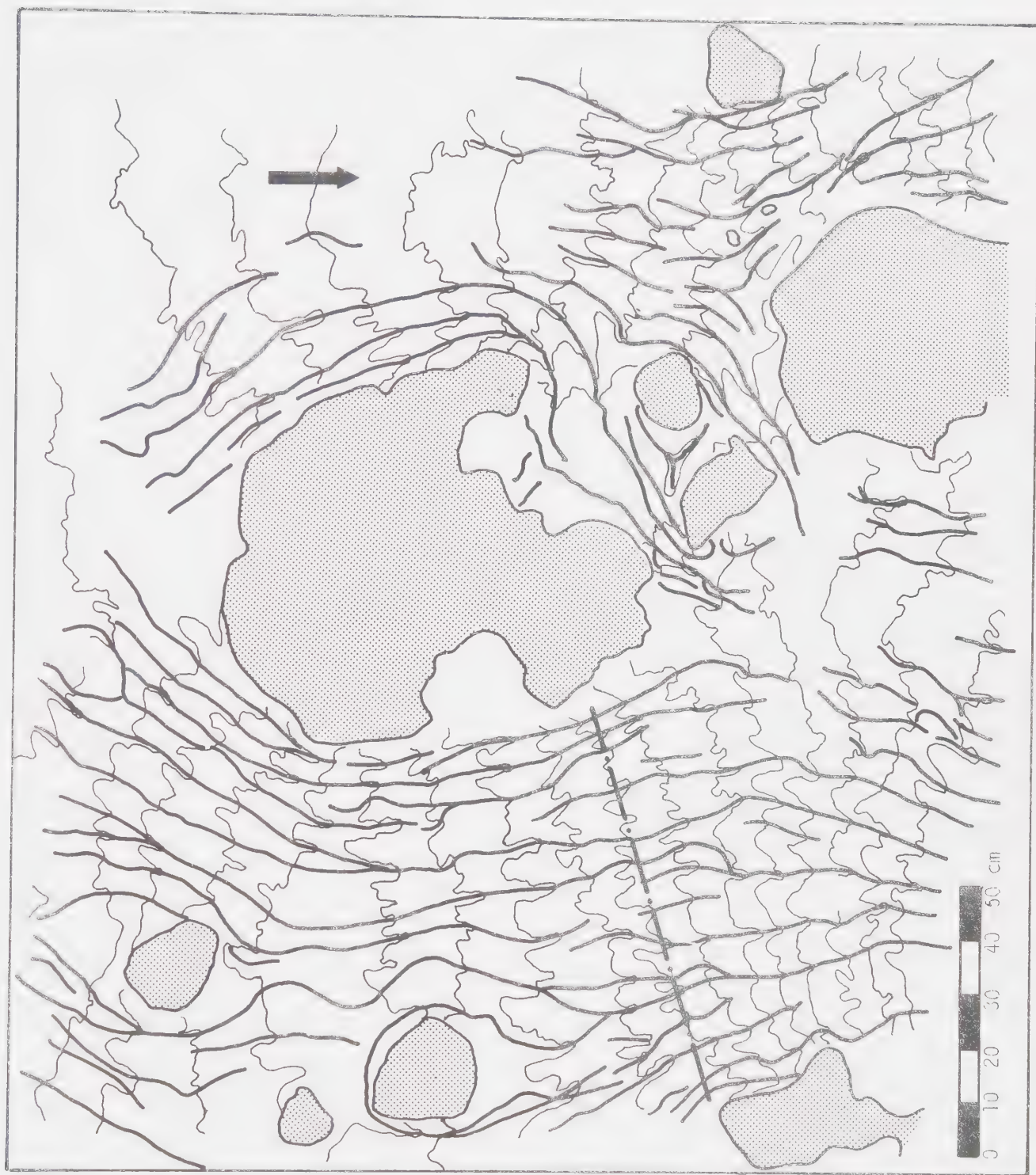
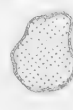


Fig. 8 : Feinerderadien und quadratische Glieder der normierten Zentrumsparabeln von Erdknospen.

Fig. 9 :
 Erdstreifen,
 Kilimanjaro. Photo-
 grammetrische Aus-
 wertung im Massstab
 1:10 (vgl. Photo 9)



Legende:

-  Höhenkurven, 1 cm
-  Vegetationsinseln oder Steine
-  Profilinie der Ausmessung
-  Mitten der Erdstreifen
-  allg. Richtung des Gefälles

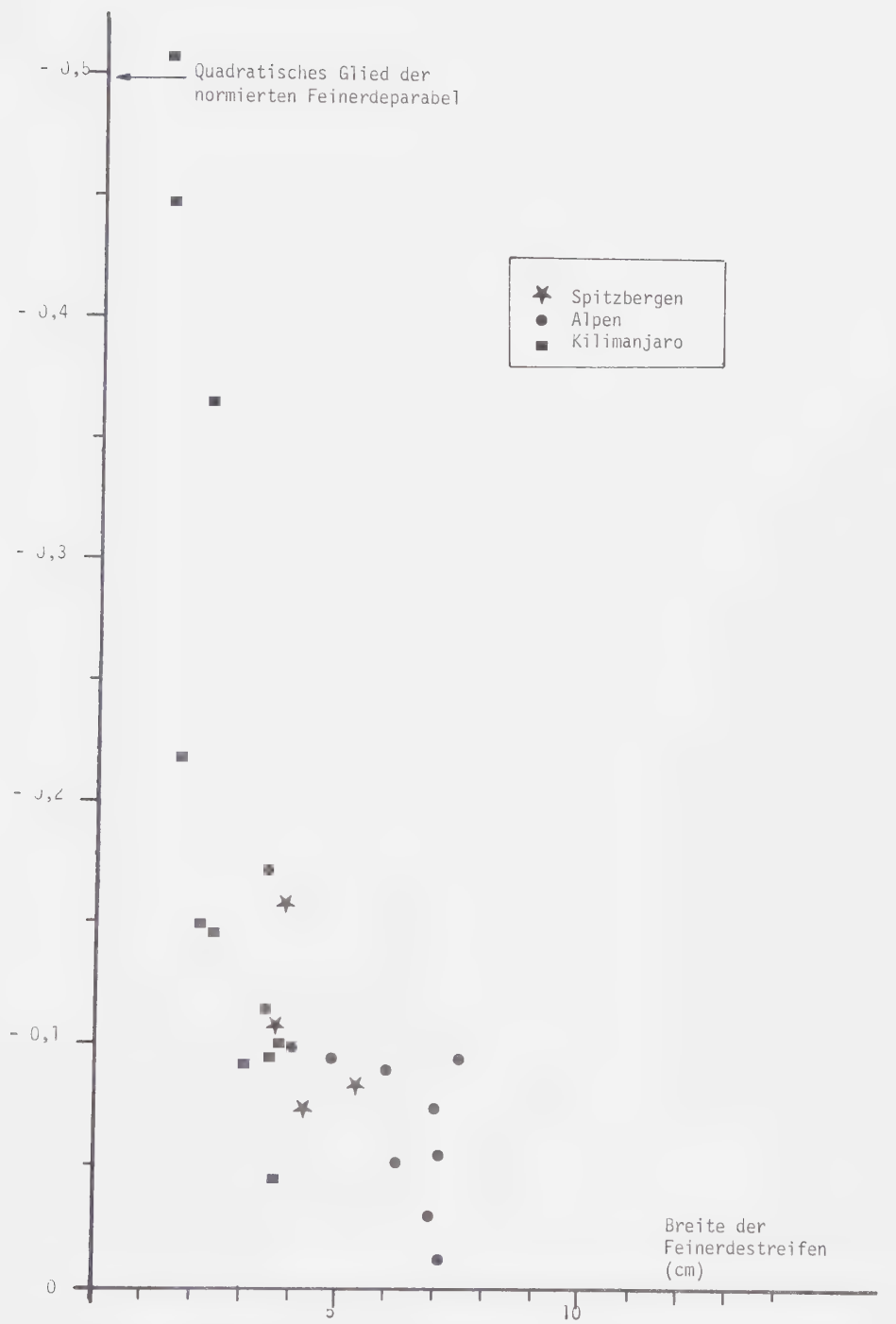


Fig. 11 : Breiten der Feinerdestreifen und quadratische Glieder
Glieder der normierten Feinerdeparabeln.

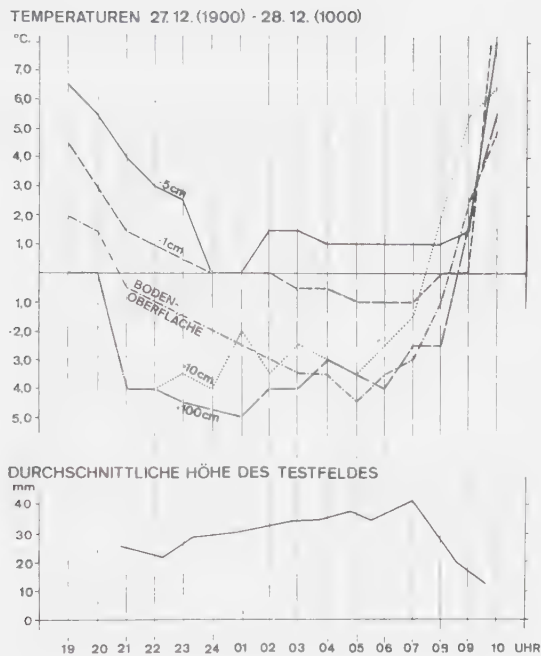


Fig. 12 : Wachstum von Kammeis in Beziehung zu den gleichzeitig herrschenden Temperaturen (Testfeld vom Kilimanjaro)

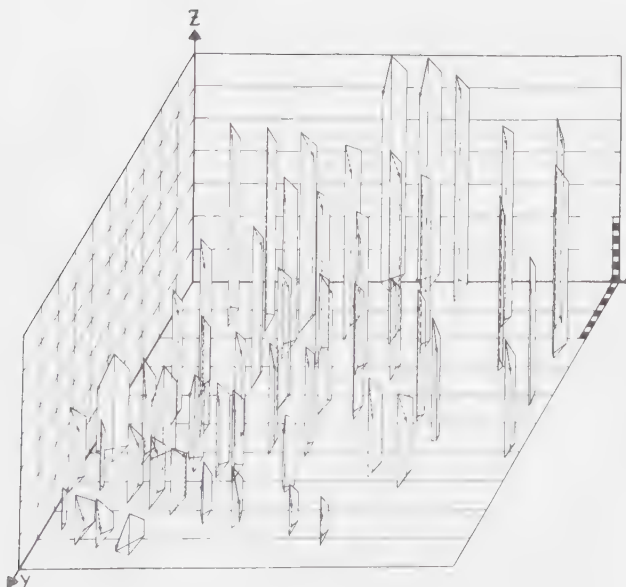


Fig. 13 : Die in Wirklichkeit 3° geneigte Testfläche wurde um zusätzliche 30° gekippt dargestellt, um die Bewegungen der einzelnen Punkte besser veranschaulichen zu können. Die Längen der Bewegungsvektoren von der Anfangs- über die Maximal- zur Endlage erfuhren aus dem gleichen Grund eine Verdoppelung. Die Grafik zeigt sowohl die räumlichen als auch die in die x-y-Ebene projizierten Bewegungen. Dargestellte Massstäbe : 10 cm.

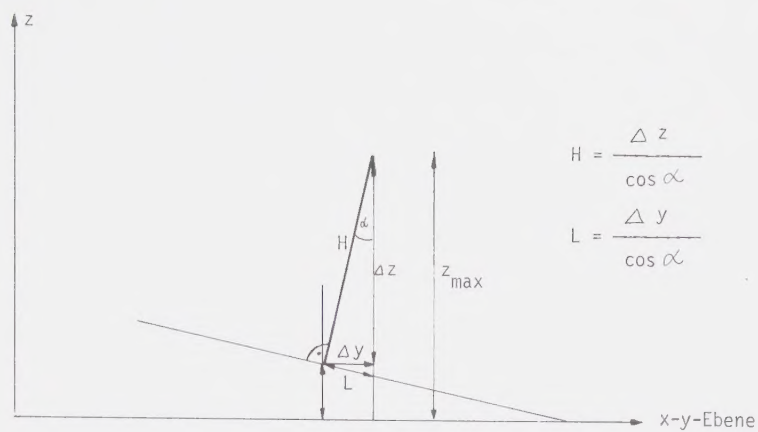


Fig. 14 : (Erläuterungen siehe Seite 52)

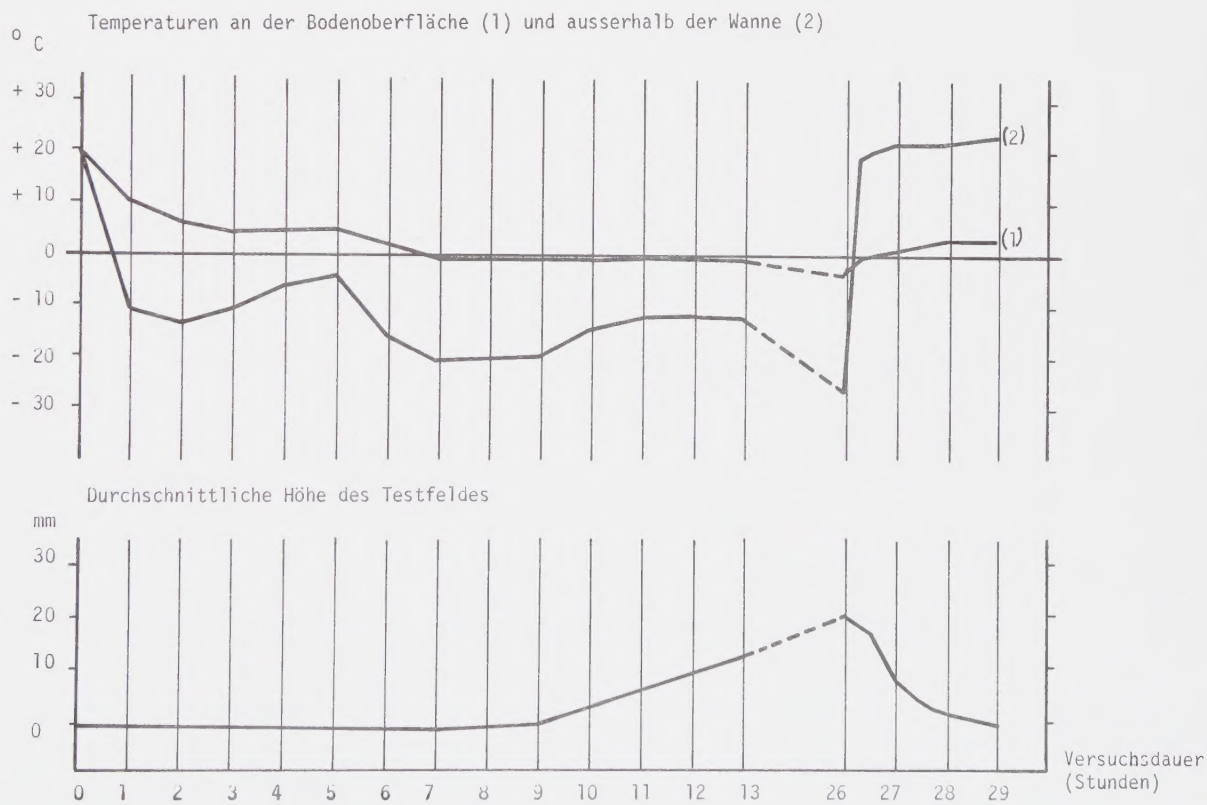


Fig. 15 : Durchschnittliche vertikale Verschiebungen der von Kammeis bewegten Bodenpartikel sowie Lufttemperaturen ausserhalb der Probenwanne und Temperaturen an der Bodenoberfläche der Probe.

ARBEITEN AUS DEM GEOGRAPHISCHEN INSTITUT DER UNIVERSITÄT ZÜRICH
=====

Folgende Arbeiten sind noch erhältlich :

- Ammann Gerhard : Beiträge zum Reisanbau im mittelmeeischen Frankreich. 1970. Fr 30.--
- Büchi Walter : Oberlugnez. Wirtschafts- und Siedlungsentwicklung vom Ende des Mittelalters bis zum 20. Jahrhundert. 1972. Fr 28.--
- Bühler Jürg : Eine Karte der Welternährungslage unter besonderer Berücksichtigung der Ergänzung fehlender Daten durch quantitative Methoden. 1971. Fr 20.--
- Dorigo Guido : Girlanden und Wanderblöcke in den Schweizer Alpen. Eine quantitative Studie. 1972. Fr 10.--
- Elsasser-Rusterholz Beatrix : Beiträge zur Siedlungs- und Wirtschaftsgeographie in den bündnerischen Walserkolonien. 1969. Fr 16.--
- Fitze Peter : Untersuchungen von Solifluktionerscheinungen im Alpenquerprofil zwischen Säntis und Lago di Como. 1969. Fr 12.--
- Freund Ralf : Vergleichende Betrachtung von Kleinformen der Solifluktion im Raume Mittellanden (Schweiz), auf West-Spitzbergen und am Kilimandjaro. 1972. Fr 20.--
- Furrer Gerhard : Die Höhenlage von subnivalen Bodenformen. Untersucht in den Bündner und Walliser Alpen und verglichen mit den Verhältnissen im oberen Braldo- und Biafotal (Karakorum). 1965. Fr 15.--
- Gächter Ernst : Die Weltindustrieproduktion 1964. Eine statistisch-kartographische Untersuchung des sekundären Sektors. 1969. Fr 12.--
- Hartmann-Brenner Daisy-Claire : Ein Beitrag zum Problem der Schutthaldenentwicklung an Beispielen des Schweizerischen Nationalparks und Spitzbergens. 1973. Fr 25.--
- Herrmann Christian : Studie zu einer naturähnlichen topographischen Karte 1:500'000 (Kombination von Schräglightschattierung mit Oberflächenbedeckungsfarben). 1972. Fr 32.--
- Jung Georg : Beiträge zur Morphogenese des Zürcher Oberlandes im Spät- und Postglazial. Mit besonderer Berücksichtigung des Greifen- und Pfäffikersees. 1969. Fr 12.--
- Kishimoto Haruko : Cartographic Measurements (Accuracy of cartometric data). 1968. Fr 20.--
- Mörgeli Werner : Beiträge zur Abgrenzung und Differenzierung des Berggebietes mit quantitativen Methoden. 1973. Fr 20.--
- Müller Jürg : Die Schweizersiedlung Helvetia im Staat Sao Paulo, Brasilien. 1972. Fr 20.--
- Nüesch Peter : Zürcher Zehntenpläne. Die Zehntenpläne im Staatsarchiv Zürich als Quellen geographischer Forschung. 1969. Fr 30.--
- Schoedler Jürg : Landnutzungsinterpretation mit Hilfe farbiger Luftbilder im Unterwallis. 1973. Fr 35.--
- Schöttli Hans : Einfluss der Landesgrenze auf die Wirtschaftsstruktur der Grenzgebiete, untersucht am Beispiel von Reiat und Hegnau. Ein Beitrag zur Grenzgeographie. 1969. Fr 20.--
- Staedeli Hanspeter : Die Stadtgebiete der Schweiz. Ein Beitrag zum Problem der Abgrenzung städtischer Gebiete. 1969. Fr 20.--
- Suter Dieter : Zentralörtliche Strukturen im aargauischen Seetal. Ein Beitrag zur Regionalplanung. 1969. Fr 10.--
- Geographisches Institut der Universität Zürich : Jahresbericht 1972/73. Fr 2.--

Bestellungen sind an das Geographische Institut zu richten. Der angegebene Preis schliesst Verpackung und Porto ein. Bestellungen werden nach Eingang des Rechnungsbetrages ausgeführt. Wir bitten die Besteller, ihre Zahlungen per Postanweisung oder Bankcheck ausschliesslich an folgende Adresse und nicht an die Kasse der Universität vorzunehmen :

Geographisches Institut
der Universität Zürich
Blümlisalpstr. 10
CH - 8006 Zürich

GEOGRAPHISCHES



ZÜRICH

INSTITUT

UNIVERSITÄT